

Leonardo Santana

**AVALIAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D BASEADA EM
PROJETO DE CÓDIGO ABERTO NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS
EM PLA**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Carlos Henrique
Ahrens, Dr. Eng. (UFSC)

Coorientador: Aurélio da Costa
Sabino Netto, Dr. Eng. (IFSC)

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santana, Leonardo

Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA / Leonardo Santana ; orientador, Carlos Henrique Ahrens ; coorientador, Aurélio da Costa Sabino Netto. - Florianópolis, SC, 2015.

166 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Impressão 3D. 3. Código aberto. 4. PLA. 5. Cabeçote extrusor. I. Ahrens, Carlos Henrique. II. da Costa Sabino Netto, Aurélio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Leonardo Santana

**AVALIAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D BASEADA EM
PROJETO DE CÓDIGO ABERTO NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS
EM PLA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 22 de junho de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng - UFSC
Orientador

Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng - IFSC
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Henrique Ahrens,
Dr.Eng - UFSC
Presidente

Prof. José Aguiomar Foggiatto,
Dr.Eng - UTFPR

Prof. Diovani Castoldi Lencina,
Dr.Eng - IFSC

Prof. Guilherme Mariz de Oliveira
Barra, Dr.Eng - UFSC

Este trabalho é dedicado a Deus, aos meus pais, Luciano e Glaucia, e a minha companheira Marina.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Henrique Ahrens pela dedicação durante a orientação do trabalho, acessibilidade, e condução de uma ótima relação entre aluno e professor.

Ao professor Aurélio da Costa Sabino Netto, por todo o suporte na condução da pesquisa, por permitir o uso do equipamento utilizado no trabalho, e por abrir as portas do IFSC para a parceria entre as universidades.

Aos professores do IFSC, Henrique, Luciano, e Marcelo, pela orientação no uso do microscópio.

Aos amigos Larozan e Guilherme, pelo companheirismo e dedicação em prol da pesquisa, em todas as etapas. Ao amigo Cassiano pelo desenvolvimento do *software* que permitiu a análise das falhas no cabeçote extrusor, e pelas discussões sobre a pesquisa. Aos amigos Igor e Philip, pela participação nas etapas de ajuste do equipamento.

A Marina pela ajuda durante a correção da dissertação.

A Claudia, pela ajuda na etapa de caracterização dos filamentos de PLA, na orientação para a construção dos gráficos e explicações sobre os experimentos, sempre que foi solicitada.

Ao amigo Matheus e ao Sr. Darlan da empresa SCiTec, por permitir a realização do ensaio mecânico de flexão.

Ao Sr. Paulo Fernandes da empresa e do blogue 3D Machine, pelas discussões e orientações sobre o funcionamento do *software* Slic3r, e pelo o fornecimento de peças para estudos complementares. Aos colegas do CTI Instituto Renato Archer, professor Jorge, e Paulo, pelo fornecimento de peças para estudos complementares.

Ao amigo Claudio, pela prontidão em ajudar sempre que foi solicitado.

A UFSC, POSMEC, e CAPES, por permitir e fornecer suporte para a realização da pesquisa. A todos que participaram direta ou indiretamente do trabalho.

RESUMO

A recente expansão na manufatura aditiva ou tecnologia de impressão 3D de baixo custo é decorrente, em partes, da expiração das patentes iniciais baseadas na tecnologia FDM e do crescimento dos chamados movimentos *open source*, disseminados através da *internet*. Diferentemente dos modelos comerciais, os modelos de baixo custo permitem maior flexibilidade e adaptações para pesquisas, já que, muitas vezes, permitem acesso aos protocolos de controle e funcionamento da tecnologia utilizada. Estas impressoras 3D, como são conhecidas, estão ganhando popularidade principalmente para uso em prototipagem rápida ou manufatura em pequena escala. Apesar disto, pouco se sabe sobre a qualidade das peças fabricadas por nestes equipamentos, e as limitações de seu desempenho. O objetivo deste trabalho foi avaliar uma impressora 3D de código aberto a partir da construção de peças em Poli Ácido Lático (PLA). A pesquisa foi dividida em três etapas. Inicialmente foram realizados estudos para caracterização dos filamentos de PLA por meio de calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise termogravimétrica (TGA), espectroscopia por infravermelho (FTIR) e medição da densidade. Em seguida, foram conduzidos dois estudos de caso para avaliar a máquina na fabricação de peças com variação de parâmetros de processo e de materiais. As peças produzidas foram avaliadas através de microscopia óptica, medição da massa e ensaio mecânico de flexão. A terceira etapa da pesquisa caracterizou-se pela avaliação da confiabilidade do cabeçote extrusor do equipamento, através de um estudo de extrusão livre, onde foi monitorada a alimentação de filamento ao sistema. Verificou-se que o equipamento não possui repetibilidade na construção de peças fabricadas com os mesmos parâmetros de processo, o que fez com que as variáveis analisadas não fossem significativas sobre as respostas. Por fim, o estudo do módulo extrusor indicou como uma das principais causas para as variações na qualidade das peças o comportamento heterogêneo do cabeçote extrusor na função de fornecimento de material para a deposição. A ação foi influenciada por efeitos como o escorregamento do filamento sobre a polia ranhurada do módulo de tracionamento do sistema de deposição e por efeitos de perda de comando de acionamento proporcionais ao aumento da velocidade de extrusão.

Palavras-chave: impressão 3D, código aberto, PLA, extrusão, cabeçote extrusor.

ABSTRACT

Additive manufacturing, or 3D printing, is currently expanding due to the patent's expiration of many FDM technologies and to the growth of open source communities widespread on Internet. Unlike commercial models, low cost ones allow more flexibility and adaptations for research, as, many times, allow access to the control protocols. These printers are becoming popular specially for rapid prototyping or small scale manufacturing use. Nevertheless, very little is known about the quality of the parts built with these equipments and about its performance limitations. This research goal was to evaluate an open source 3D printer by its capacity of building Poly-Lactic Acid (PLA) parts. The research was divided in three stages. First were made studies to characterize the PLA filaments using Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermogravimetric Analysis (TGA), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and density measurement. Next, two case studies were conducted to analyze the machine capability of building samples made with different building parameters and materials. The parts produced were evaluated using optical microscopy, mass measurement and bending test. The third stage consisted on the reliability evaluation of the extruder head through a free extrusion study, where the system's feed stock was monitored. It was observed that the equipment does not have repeatability when building samples with the same parameters, which made the variables analyzed insignificant for the answers. Finally, the extrusion module study showed that the extrusion head heterogeneous behavior while supplying material for deposition was one of the main causes for part's quality variation. This action was influenced by the filament's slippage over the hobbled pulley of the traction module and effects caused by the lost of the driving command, proportional to the extrusion speed increasing.

Keywords: 3D printing, open source, PLA, extrusion, extruder head

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas dos processos de manufatura aditiva.	33
Figura 2 – Modelo sólido em CAD (a) convertido para o formato STL (b).	34
Figura 3 – Fatiamento do modelo sólido (a) e perfil 2D (b).	34
Figura 4 – Fatiamento uniforme (a) e adaptativo (b)	35
Figura 5 – Tratamento das superfícies de peças em ABS fabricadas por manufatura aditiva por extrusão, (a) sem tratamento e (b) com tratamento.	36
Figura 6 – Princípio do processo FDM da Stratasys, Inc.	37
Figura 7 – Parâmetros do processo FDM (a), orientação de construção (b).	39
Figura 8 – Estratégias de preenchimento no processo FDM, (a) <i>raster</i> , (b) <i>contour</i> , (c) <i>contour</i> e <i>raster</i> , e (d) camadas alternadas em 90°.	41
Figura 9 – Efeito <i>start-stop</i>	45
Figura 10 – Composição de uma peça obtida por FDM.	46
Figura 11 – União entre camadas, e na mesma camada.	47
Figura 12 – Processo de formação da união entre dois filamentos: (a) contato superficial; (b) crescimento do “pescoço”; (c) difusão molecular e randomização.	47
Figura 13 – Crescimento do “pescoço” e temperatura do filamento polimérico depositado.	48
Figura 14 – Localização dos corpos de prova na plataforma de construção.	49
Figura 15 – Configurações de mesoestrutura para peças em ABS unidirecionais, (a) desalinhada e (b) alinhada.	52
Figura 16 – Mesoestrutura gerada com as configurações alinhada (a) e desalinhada (b).	53
Figura 17 – Orientação de construção das amostras, estudo de Bagsik <i>et al.</i> (2010).	53
Figura 18 – Resistência à tração das peças, em relação ao ângulo de varredura e <i>gap</i> negativo.	54
Figura 19 – Resultado do ensaio de tração em relação à velocidade de impressão (a) e temperatura da base (b).	56
Figura 20 – Superfície não homogênea de uma peça fabricada em camadas.	58
Figura 21 – Vazios entre filamentos depositados e variações dimensionais.	59
Figura 22 – Equipamento RepRap e suas partes.	60

Figura 23 – Sistema de deposição Fab@home (a) uma seringa, (b) duas seringas.	61
Figura 24 – Modelos utilizados para avaliação dos <i>softwares</i>	64
Figura 25 – Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.	66
Figura 26 – Duração das etapas.	68
Figura 27 – Parafuso ranhurado do sistema extrusor.	70
Figura 28 – Falhas na peça, resultantes de problemas no equipamento.	71
Figura 29 – Polia ranhurada do sistema de alimentação de material.	71
Figura 30 – Impressora 3D IFSC.	75
Figura 31 – Plataforma de construção (a), estrutura de alumínio (b), resistência elétrica (c), e isolante térmico (d).	76
Figura 32 – Módulo de tracionamento do filamento, <i>Bulldog XL</i>	77
Figura 33 – Vista frontal do <i>Bulldog XL</i> , sistema de ajuste da pressão sobre o filamento.	77
Figura 34 – Bico aquecido e suas principais partes.	78
Figura 35 – Diagrama de etapas da pesquisa.	80
Figura 36 – Filamentos de PLA analisados na pesquisa.	81
Figura 37 – Desprendimento dos filamentos após a fabricação.	85
Figura 38 – Alinhamento do eixo X em relação ao eixo Z.	88
Figura 39 – Variação na quantidade de preenchimento: (a) 20 %, (b) 40 %, (c) 60 % e (d) 100 %. Simulação no <i>software Repetier</i>	91
Figura 40 - Representação dos <i>loops</i>	92
Figura 41 – Dispositivo mecânico de medição sobre o cabeçote extrusor (a), e (b) rodízio emborrachado.	94
Figura 42 – Dinâmica de aquisição de dados.	95
Figura 43 – Curvas DSC para os filamentos de PLA analisados.	97
Figura 44 – Curva TGA para o filamento de PLA amarelo.	98
Figura 45 – Curva FTIR para o filamento de PLA amarelo.	99
Figura 46 – Curva FTIR para o PLA, obtida no estudo de Chieng <i>et al.</i> (2014).	100
Figura 47 – Representação da massa média obtida em cada situação.	102
Figura 48 – Imagem microscópica da superfície do topo, CP1 da Situação 3 (massa = 6,28 g).	104
Figura 49 - Imagem microscópica da superfície do topo, CP2 da Situação 3 (massa = 5,61 g).	104
Figura 50 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros sobre a média das massas, (a) espessura da camada, (b) velocidade de impressão, e (c) temperatura de extrusão.	106
Figura 51 – Variação da massa em função da ordem de fabricação.	107

Figura 52 - Representação do módulo de ruptura médio, obtido em cada Situação.....	108
Figura 53 – Superfície homogênea, no topo do CP1, Situação 4.	109
Figura 54 - Falhas na união entre os filamentos depositados, CP3, Situação 4.....	110
Figura 55 – Delaminação das camadas próximas ao topo das peças...	110
Figura 56 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros sobre a média do módulo de ruptura, (a) espessura de camada, (b) velocidade de impressão, e (c) temperatura de extrusão.	111
Figura 57 – Variação do módulo de ruptura em função da ordem de fabricação.	112
Figura 58 – Falhas de deposição na construção das peças.	114
Figura 59 – Representação da massa média e os desvios padrão por Situação.....	116
Figura 60 – Variação da massa por ordem de fabricação, segundo estudo de caso.	117
Figura 61 – Variação da massa em função dos níveis de velocidade de impressão (a), e temperatura de extrusão (b).....	119
Figura 62 – Representação do módulo de ruptura médio e os desvios padrão por Situação.....	120
Figura 63 – Variação do módulo de ruptura (MOR) por ordem de fabricação, segundo estudo de caso.....	122
Figura 64 – Variação do módulo de ruptura em relação à velocidade de impressão (a), e temperatura de extrusão (b).....	122
Figura 65 – Ruptura total das amostras no ensaio de flexão.	124
Figura 66 – Ausência de delaminação das camadas, após o ensaio de flexão.....	124
Figura 67 – Presença de vazios entre os filamentos depositados.	125
Figura 68 – Distorções geométricas e variações dimensionais.	125
Figura 69 – Escorregamento do filamento, Situação 4 (V_e2T1).	127
Figura 70 – Variação da perda de comando média (PDC) em função da velocidade de extrusão.	128
Figura 71 – Comparação entre a perda de comando e o escorregamento real (ERF), Situação 2.....	129
Figura 72 – Representação do comprimento de filamento deslocado, em função de PDC e ERF.	130
Figura 73 – Adesão de material no elemento ranhurado.....	132
Figura 74 – Efeitos da remoção de material pela polia ranhurada no filamento não processado.....	132

Figura 75 – Obstrução na interface entre o corpo de inox e a região aquecida, (a) condição normal, (b) entupimento parcial, e (c) entupimento total.	135
Figura 76 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros sobre o tempo de fabricação, primeiro estudo de caso.....	139
Figura 77 – Relação entre os níveis de velocidade e o tempo de construção, segundo estudo de caso.....	140
Figura 78 – Curva TGA para o filamento de PLA cinza.	159
Figura 79 – Curva TGA para o filamento de PLA natural A.	159
Figura 80 – Curva TGA para o filamento de PLA natural B.	160
Figura 81 – Curva FTIR para o filamento de PLA cinza.	160
Figura 82 – Curva FTIR para o filamento de PLA natural A.....	161
Figura 83 – Curva FTIR para o filamento de PLA natural B.....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos no estudo de Sun <i>et al.</i> (2008).....	49
Tabela 2 – Parâmetros e níveis utilizados no experimento.	55
Tabela 3 – Parâmetros de processo e níveis associados, Albuquerque (2014).	56
Tabela 4 – Melhores condições de construção, Albuquerque (2014)....	57
Tabela 5 - Parâmetros de processo avaliados e níveis atribuídos.....	84
Tabela 6 – Organização dos experimentos, arranjo ortogonal L9.	84
Tabela 7 – Tabela de experimentos.	86
Tabela 8 – Parâmetros fixos.	90
Tabela 9 – Ajuste automático da largura do filamento pelo Slic3r.	91
Tabela 10 – Condições de estudos em relação aos parâmetros de processo.....	96
Tabela 11 – Temperatura de fusão e transição vítrea, ensaio de DSC. .	97
Tabela 12 – Temperaturas de degradação dos filamentos de PLA.....	99
Tabela 13 – Medição da densidade do PLA amarelo, e natural A.	101
Tabela 14 – Resultado da medição da massa das amostras.	101
Tabela 15 – Comparação entre a massa medida e a massa calculada.	102
Tabela 16 – Resultados da medição do módulo de ruptura (MOR). ...	108
Tabela 17 – Análise de variância para a massa.	113
Tabela 18 – Análise de variância para o módulo de ruptura.	113
Tabela 19 – Resultado da medição da massa dos corpos de prova fabricados, segundo estudo de caso.....	115
Tabela 20 – Comparação entre a massa medida e a massa calculada, segundo estudo de caso.	117
Tabela 21 – Análise de variância para massa, segundo estudo.	118
Tabela 22 – Resultados para o módulo de ruptura (MOR), segundo estudo de caso.	120
Tabela 23 – Análise de variância para o módulo de ruptura, segundo estudo.	123
Tabela 24 – Valores percentuais médios de ERF, PDC, e ETNS, por Situação.	126
Tabela 25 – Análise de variância para o escorregamento (ERF).	127
Tabela 26 – Análise de variância para a perda de comando (PDC). ...	128
Tabela 27 – Comprimento de filamento teórico e efetivo.	129
Tabela 28 – Medição do diâmetro do filamento, PLA amarelo.	133
Tabela 29 – Medição do diâmetro do filamento, PLA natural A.	134
Tabela 30 – Estatística geral do primeiro estudo de caso.....	136
Tabela 31 – Estatística geral do segundo estudo de caso.	136
Tabela 32 – Total de peças por grupo de falhas nos estudos de caso..	138

Tabela 33 – Análise de variância para o tempo de construção, primeiro estudo de caso.....	139
Tabela 34 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 20 mm/min e 190 °C.	162
Tabela 35 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 20 mm/min e 200 °C.	162
Tabela 36 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 20 mm/min e 210 °C.	163
Tabela 37 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 40 mm/min e 190 °C.	163
Tabela 38 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 40 mm/min e 200 °C.	164
Tabela 39 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 40 mm/min e 210 °C.	164
Tabela 40 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 60 mm/min e 190 °C.	165
Tabela 41 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 60 mm/min e 200 °C.	165
Tabela 42 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 60 mm/min e 210 °C.	166

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferenças entre os processos de MA.	32
Quadro 2 – Características técnicas de quatro sistemas de baixo custo.	62
Quadro 3 – Resultados da avaliação do módulo mecânico.	69
Quadro 4 – Avaliação da impressora 3D Prusa I2.	70
Quadro 5 – Relação dos <i>softwares</i> e <i>hardwares</i> utilizados no equipamento.	79
Quadro 6 – Grupo de falhas e suas descrições.	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> – Acrilonitrila Butadieno Estireno
AFFs	Agentes Formadores de Fatias
AP	Adesão à plataforma de construção
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Sociedade Americana para Ensaios de Materiais
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Desenho assistido por computador
CE	Comprimento efetivo médio de filamento alimentado
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> – Controle Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
CT	Comprimento de filamento médio teoricamente deslocado
DF	Desvios de Forma
DMC	Descartadas para manter a Mesma Condição
DP	Deposição
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> – Calorimetria Diferencial de Varredura
EC	Espessura de Camada
EQ	Equipamento
ERF	Escorregamento Real do Filamento
ETNS	Erro Total no Sistema
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> – Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> – Fabricação por Filamento Fundido
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> – Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
F	Fator F para análise de variância
GL	Graus de Liberdade
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i> – Polietileno de Alta Densidade
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i> – Polietileno de Baixa Densidade
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> – Manufatura Laminar de Objetos
MA	Manufatura Aditiva

MOR	Módulo de Ruptura
MPD	<i>Molten Polymer Deposition</i> – Deposição de Polímero Fundido
P	Valor P para análise de variância
PC	<i>Polycarbonate</i> – Policarbonato
PCL	<i>Polycaprolactone</i> – Policaprolactona
PDC	Perda de Comando
PE	<i>Polyethylene</i> – Polietileno
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i> – Politereftalato de Etileno
PLA	<i>Poly Lactic Acid</i> – Poli Ácido Lático
PP	<i>Polypropylene</i> – Polipropileno
PPSF	<i>Polyphenylsulfone</i> – Polifenilsulfona
PR	Prototipagem Rápida
PVC	<i>Poly Vinyl Chloride</i> – Policloreto de Vinila
RepRap	<i>Replicating Rapid – prototyper</i> – Prototipagem Rápida Replicável
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> – Sinterização Seletiva a Laser
SQ	Soma dos Quadrados
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
TE	Temperatura de Extrusão
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i> – Análise Termogravimétrica
ULTEM	Polieterimida
UV	Ultravioleta
VI	Velocidade de Impressão

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Desvio padrão
σ_f	Desvio padrão do diâmetro
\bar{X}	Média aritmética
ΔS_g	Movimento médio na zona de fusão da extrusora durante mudanças no fluxo de material
d_t	Diâmetro médio do filamento
E	Espessura de camada
M	Maior
m	Menor
T	Temperatura de extrusão
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_f	Temperatura de fusão
T_d	Temperatura de degradação
V	Velocidade de impressão
V_e	Velocidade de extrusão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	29
1.1.1 Objetivo geral	29
1.1.2 Objetivos específicos	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 MANUFATURA ADITIVA: CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	31
2.1.1 Etapas de planejamento dos processos de MA	32
2.2 MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO	37
2.2.1 Parâmetros e estratégias de preenchimento: processo FDM..	38
2.2.2 Fluxo de material.....	42
2.2.3 Qualidade das peças produzidas por FDM	46
2.2.3.1 União entre filamentos depositados	46
2.2.3.2 Comportamento mecânico de peças obtidas por FDM.....	51
2.2.3.3 Defeitos internos em peças produzidas por FDM	57
2.3 EQUIPAMENTOS DE IMPRESSÃO 3D BAIXO CUSTO E CÓDIGO ABERTO	60
2.3.1 <i>Softwares</i> livres para fatiamento	63
2.3.2 Materiais utilizados em equipamentos de baixo custo e código aberto.....	65
2.3.2.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	65
2.3.2.2 Poli Ácido Láctico (PLA)	66
2.3.3 Avaliação de desempenho de equipamentos de código aberto.....	67
2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CONSIDERAÇÕES GERAIS	72
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
3.1 EQUIPAMENTO	75
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	79
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	81
3.3.1 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	82
3.3.2 Análise termogravimétrica (TGA).....	82
3.3.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	82
3.3.4 Medição da densidade.....	82
3.4 ESTUDOS DE CASO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS	83
3.4.1 Estudo caso de fabricação: PLA amarelo	83
3.4.2 Estudo de caso de fabricação: PLA natural A.....	85
3.4.3 Procedimentos para a fabricação das amostras.....	87
3.4.4 Microscopia.....	92
3.4.5 Medição da massa.....	93

3.4.6 Ensaio de flexão	93
3.5 AVALIAÇÃO DO CABEÇOTE EXTRUSOR	93
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	97
4.2 MEDIÇÃO DA DENSIDADE	100
4.3 ESTUDO DE CASO DE FABRICAÇÃO: PLA AMARELO.....	101
4.4 ESTUDO DE CASO DE FABRICAÇÃO: PLA NATURAL A ...	115
4.5 AVALIAÇÃO DO CABEÇOTE EXTRUSOR	126
4.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS	131
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	141
5.1 CONCLUSÃO	141
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
REFERÊNCIAS	145
APÊNDICE A – Caracterização dos materiais	159
APÊNDICE B – Avaliação do cabeçote extrusor	162

1 INTRODUÇÃO

A internet trouxe novas possibilidades de interação e transformou o público consumidor em agente. A aldeia global vislumbrada por McLuhan e Fiore (1971), na qual as tecnologias da informação seriam elo de ligação entre indivíduos e sistemas em qualquer lugar do globo, tornou-se realidade e houve aceleração significativo nos processos socioculturais. Isso foi possibilitado pelo surgimento de comunidades virtuais (PAULINO, 2012) que partilham determinado propósito ou interesse comum.

Atualmente o fluxo de geração e desenvolvimento de ideias e produtos não deve, necessariamente, partir da indústria para o consumidor, mas também de forma inversa, com a indústria se beneficiando de iniciativas do público. O mundo industrial, segundo Nonaka e Takeuchi (1995), tem assistido a uma crescente conscientização da importância do conhecimento — em suas diferentes formas — como fator econômico dominante para a inovação das empresas.

Neste contexto têm sido formadas as chamadas comunidades *open source*. O conceito *open source* (código aberto), segundo Johnson *et al.* (2014), é utilizado para referenciar o direito de copiar, redistribuir e modificar *hardware* e *software*. Bruijn (2010) especifica que a função mais importante das licenças abertas é garantir acesso não-exclusivo a propriedade intelectual. A utilização e o aperfeiçoamento de produtos de código aberto podem ser realizados sem autorização, o que reduz custos de transações e permite técnicas modulares de desenvolvimento, consideradas boas formas para se manter alto padrão de qualidade, por permitirem alterações pontuais nos componentes.

O livre intercâmbio informacional aplicado ao âmbito da Manufatura Aditiva permitiu o desenvolvimento de impressoras 3D¹ de código aberto. Sauramo (2014) define o termo “impressão 3D” como uma tecnologia de fabricação na qual um objeto é construído camada-a-camada, de baixo para cima, baseado em um projeto tridimensional computadorizado.

¹ O termo impressora 3D vem sendo amplamente utilizado para equipamentos de baixo custo de uso particular (domésticos) e por alguns sistemas comerciais maiores (ADDITIVE MANUFACTURING IN FP7 AND HORIZON 2020, 2014).

Curiosamente, a tecnologia não foi desenvolvida por grandes empresas com grandes recursos, mas por pesquisadores universitários e hobbystas de todo o mundo. Assim, projetos open source facilitaram novos desenvolvedores a se estabelecerem em espaços pequenos, montando uma nova gama de equipamentos simples e econômicos — em uma história bastante semelhante à do desenvolvimento do computador pessoal² (SAURAMO, 2014, p. 6-7).

A expansão dessas novas tecnologias de impressão 3D é decorrente de fatores como a expiração das patentes da impressão baseada na tecnologia FDM, dos movimentos de código aberto — desde *software* a *hardware*, como o Arduino —, e do compartilhamento gratuito de arquivos pela internet (CANESSA, 2013). As duas principais comunidades *on-line* criadas para desenvolver e compartilhar o projeto de equipamentos de fabricação 3D foram a RepRap e a Fab@home. (BARNATT, 2014).

Para Stephens (2013b), os equipamentos estão ganhando popularidade para uso em prototipagem rápida ou manufatura em pequena escala. O desenvolvimento de versões *desktop* de baixo custo tornou a tecnologia amplamente acessível para o uso doméstico e em negócios.

A tecnologia mais comum utilizada nessas impressoras consiste na Deposição de Polímero Fundido (MPD - *Molten Polymer Deposition*), também conhecida por FDM (*Fused Deposition Modeling*) ou FFF (*Fused Filament Fabrication*), na qual um filamento termoplástico é forçado ao longo de um bico de extrusão aquecido (BUMGARNER, 2013). Os materiais de construção mais utilizados atualmente são o Poli Ácido Lático (PLA) e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), segundo Borah (2014).

Stephen *et al.* (2013a) avaliaram a necessidade de se investigar as propriedades mecânicas do PLA enquanto material de construção, já que a maioria das pesquisas em manufatura aditiva por extrusão é voltada ao ABS. Comparado ao ABS, o PLA é um material ecológico e seguro à saúde humana. Para Albuquerque (2014), essas propriedades ambientais e biocompatíveis, ligadas à crescente expansão da impressão 3D, formam uma dupla da qual se espera uma série de avanços tecnológicos em prol da sociedade.

² Tradução livre do autor.

Diferentemente dos modelos comerciais de máquinas FDM, os modelos desenvolvidos com base no conceito de código aberto permitem maior flexibilidade e adaptações para pesquisas, já que muitas vezes permitem acesso aos protocolos de controle e funcionamento da tecnologia utilizada. Equipamentos que utilizam o conceito de *hardware* e *software* abertos facilitam o acesso às tecnologias de manufatura aditiva, para o desenvolvimento em diversas áreas de pesquisa (PALLAROLAS, 2013).

Contudo, Albuquerque (2014) adverte que, devido à natureza do projeto *open source*, não há uma autoridade que regule e padronize as características técnicas de cada filamento, que, dependendo de material, cor e fornecedor, alteram os parâmetros técnicos ideais para a impressão. Cabe ao usuário encontrar os valores adequados, normalmente através do método de tentativa e erro. Azevedo (2013) lembra, ainda, que essa natureza coletiva faz com que as impressoras ainda falhem em alguns aspectos, como robustez, praticidade e projeto, o que pode dificultar sua operação por pessoas não incluídas no grupo de desenvolvedores.

Uma importante parcela do conhecimento sobre o uso de impressoras 3D de código aberto se encontra disponível em diferentes plataformas, como fóruns, blogues, *wikis*, entre outros ambientes que vivenciam o conceito proposto pelas comunidades virtuais. Experiências práticas sobre a configuração de parâmetros de processo, problemas e soluções encontrados, e melhoramento de *hardware* são divulgados e discutidos por entusiastas das mais diversas áreas do conhecimento, o que não limita a tecnologia ao caráter técnico-científico, mas propicia à democratização do processo.

Apesar do crescimento pelo interesse e disseminação da tecnologia de impressoras 3D baseadas em código aberto, ainda há muitas dúvidas sobre a qualidade das peças fabricadas nesses equipamentos, a falta de padronização em relação à calibração dos equipamentos e a utilização do PLA como material de impressão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um equipamento de manufatura aditiva baseado em projeto de código aberto a partir da fabricação de peças em PLA.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) caracterizar os filamentos de PLA disponíveis para a pesquisa, por ensaios térmicos e químicos;
- b) fabricar peças com diferentes filamentos de PLA e com variações nos parâmetros de processamento;
- c) avaliar a qualidade das peças fabricadas por microscopia óptica, propriedades mecânicas, e medição da massa;
- d) analisar o desempenho e confiabilidade do cabeçote extrusor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA: CONSIDERAÇÕES GERAIS

No final da década de 1980, um novo processo foi desenvolvido baseado na adição de material em camadas planas (fatia-a-fatia), isto é, no princípio de manufatura aditiva de camadas. Partindo da premissa de que o processo em questão tinha como aplicação inicial a fabricação rápida de peças, visando à materialização de ideias (protótipos), sem muita exigência com relação à resistência e precisão, o mesmo foi denominado Prototipagem Rápida (PR) (VOLPATO *et al.*, 2007).

Atualmente a norma ASTM F2792 (2010), regulamentou o termo Manufatura Aditiva (MA) para definir os processos de união de materiais para construção de objetos a partir de um modelo 3D, geralmente camada a camada, em oposição aos métodos de manufatura por subtração. Ainda segundo a norma, a tecnologia MA apresenta como sinônimos as seguintes nomenclaturas: fabricação aditiva, processos aditivos, manufatura por adição de camadas, manufatura por camadas e fabricação de formas complexas.

A adequação para o termo manufatura aditiva está relacionada principalmente ao fato de que estas tecnologias não se limitam mais apenas à fabricação de protótipos, mas também a fabricação de produtos finais (GIBSON *et al.*, 2010; ALBERTI *et al.*, 2014).

O primeiro sistema de MA, o “*Stereolithography Apparatus*” (Estereolitografia), foi comercializado em 1988. Desde então outros sistemas de manufatura aditiva foram desenvolvidos por empresas comerciais e comunidades acadêmicas. Entre eles encontram-se, por exemplo: a sinterização seletiva a laser (SLS), modelagem por fusão e deposição (FDM) desenvolvida pela Stratasys®, laminação de folhas (LOM) desenvolvida pela Helisys®, entre outras (LUO *et al.*, 2002).

As principais diferenças entre os processos de manufatura aditiva podem ser descritas sobre quatro aspectos: estado inicial da matéria prima, fonte de energia, método de formação das camadas e a condição sobre a qual a peça é construída (XU *et al.*, 1999). Maia *et al.* (2013) utilizam o termo AFFs (Agentes Formadores de Fatias), para descrever os princípios que atuam sobre a matéria prima de construção, na formação das camadas. Segundo os autores esses agentes podem se apresentar como um feixe de energia (laser, elétrons, íons), um cabeçote de impressão (jato de tinta ou extrusão polimérica), lâmina, associados ou não com um sistema mecânico como um rolo de espalhamento de pó, régua niveladoras de líquido ou aparadores de camadas. O Quadro 1

apresenta de forma resumida alguns processos de manufatura aditiva, citados por Gibson *et al.* (2010).

Quadro 1- Diferenças entre os processos de MA.

Tecnologia	Princípio de funcionamento	Material
Processo por fotopolimerização	Radiação UV (Ultra Violeta) é utilizada para curar um polímero fotocurável.	Resinas e polímeros fotocuráveis.
Processo por fusão de pós	Um feixe laser é conduzido sobre um leito contendo pó, fundindo termicamente os materiais e formando a seção transversal da camada.	Polímeros, metais, e cerâmicas.
Sistemas baseados em extrusão	Deposição de material por um cabeçote extrusor. O material fundido logo após depositado se resfria e solidifica.	Polímeros, cerâmicas.
Processo por laminação de chapas	O processo utiliza um laser de CO ₂ , que corta as laminas. As folhas podem ser cortadas e empilhadas, ou empilhadas e cortadas. A união entre as folhas pode ser por colagem com adesivos, processo de união térmica, entre outros.	Papel, polímeros.

Fonte: Adaptado de GIBSON *et al.* (2010).

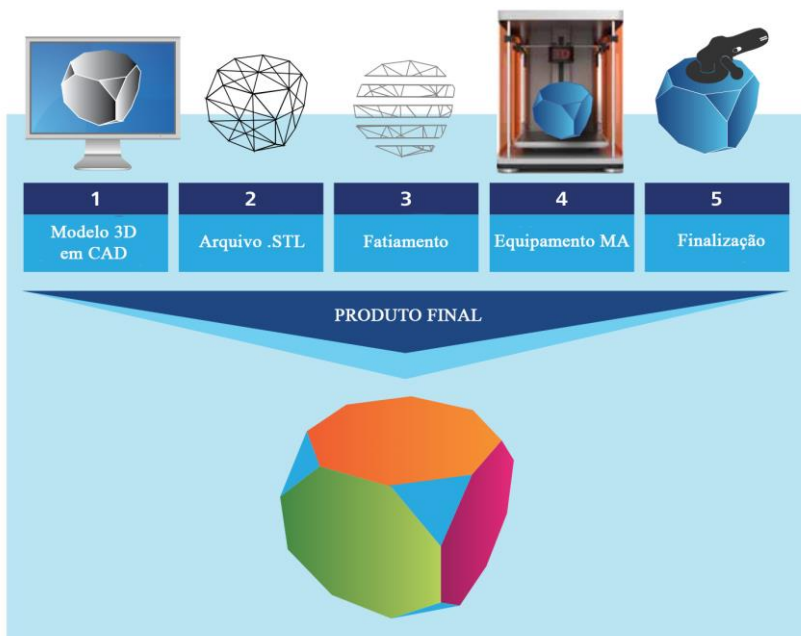
2.1.1 Etapas de planejamento dos processos de MA

De uma maneira geral as diversas tecnologias de manufatura aditiva compartilham das mesmas características no que está relacionado

ao aspecto computacional de planejamento das etapas do processo, divergindo-se evidentemente no princípio físico de construção dos modelos (MARTINS *et al.*, 2010).

Os processos de manufatura aditiva iniciam-se com a criação de um modelo tridimensional (3D), através do uso de um *software* CAD. O modelo 3D geralmente é convertido para um arquivo no formato STL (*Standard Tessellation Language*). Este arquivo STL é conduzido a um *software* de planejamento de processo, onde é fatiado em camadas individuais. As informações geradas são enviadas para o equipamento de manufatura aditiva, que irá construir os objetos pela adição de camadas (COTTELEER *et al.*, 2014). A Figura 1 mostra de forma sintetizada as etapas dos processos de manufatura aditiva.

Figura 1 – Etapas dos processos de manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de COTTELEER *et al.* (2014).

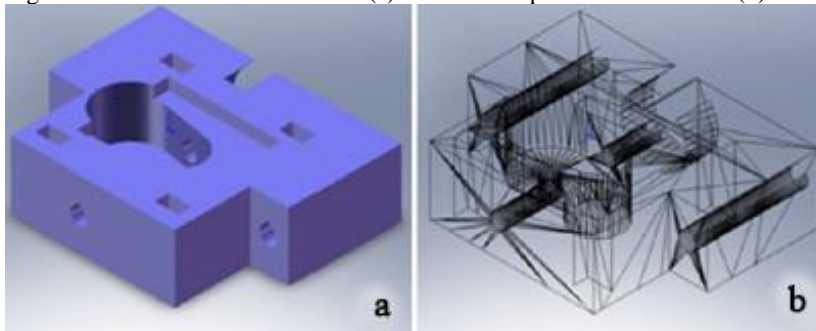
A criação do modelo CAD é a primeira etapa de um processo de manufatura aditiva, e equivale à descrição das geometrias externas da peça a ser fabricada. Nesta etapa a utilização de equipamentos

destinados à engenharia reversa, como *scanner a laser*, podem ser utilizados na criação da peça (GIBSON *et al.*, 2010).

O formato STL, citado anteriormente, é definido pela norma ASTM F2792 (2010) como a interface padrão para os sistemas de manufatura aditiva. Consiste na representação triangular de uma superfície geométrica tridimensional. A superfície é dividida em uma série de pequenos triângulos, onde cada um é descrito por uma direção perpendicular e três pontos representando seus vértices. Cada um dos triângulos é parte do limite entre as partes interna e externa do objeto (RAULINO *et al.*, 2013). A Figura 2 mostra um modelo sólido 3D (a) e o arquivo STL gerado (b).

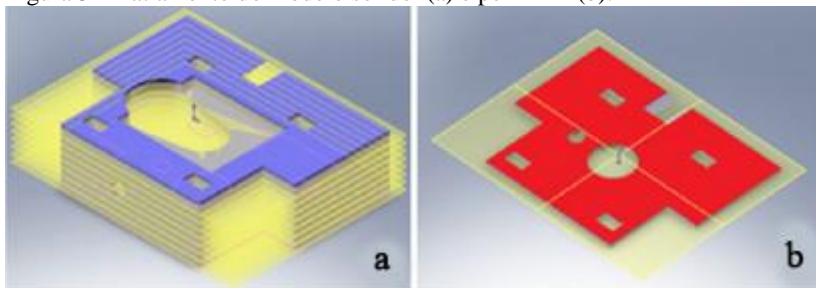
As informações a respeito da geometria das camadas são obtidas através do fatiamento do modelo CAD 3D, no formato STL, pelo *software* de planejamento do processo, gerando perfis 2D (fatias) (Figura 3 (a) e (b)) (VOLPATO *et al.*, 2009).

Figura 2 – Modelo sólido em CAD (a) convertido para o formato STL (b).



Fonte: Adaptado de RAULINO *et al.* (2013).

Figura 3 – Fatiamento do modelo sólido (a) e perfil 2D (b).



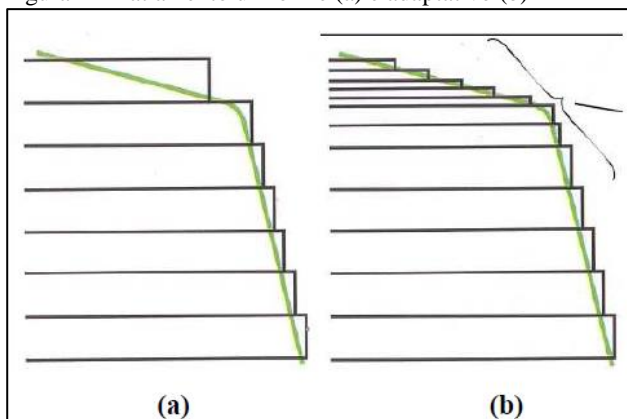
Fonte: Adaptado de RAULINO *et al.* (2013).

O fatiamento consiste em uma importante tarefa, uma vez que também tem influência sobre o acabamento das superfícies geradas, precisão, tempo de fabricação e as propriedades mecânicas das peças fabricadas (KOC, 2001; ZHOU *et al.*, 2004).

Em geral existem dois tipos de fatiamento comumente utilizados na determinação da espessura de camada: o uniforme e o adaptativo. O método uniforme é a abordagem mais simples, onde a peça é fatiada em intervalos iguais, ou seja, consiste na obtenção de camadas com espessuras constantes ao longo do eixo de construção Z. No entanto há uma relação de compromisso na escolha da espessura de camada. Ao utilizar uma espessura de camada pequena o acabamento na superfície da peça melhora, porém resulta em mais camadas e o tempo de fabricação aumenta, por outro lado ao optar por uma espessura maior o tempo de fabricação diminui e a qualidade da superfície gerada geralmente diminui (MA e HE, 1999; VOLPATO *et al.*, 2011).

Já o fatiamento adaptativo, corresponde a variações da espessura da camada com base nas modificações geométricas do modelo ao longo da direção de construção (ZHOU *et al.*, 2004). Em relação ao fatiamento uniforme, o adaptativo apresenta como vantagens a redução do tempo de construção, melhoramento no acabamento das superfícies geradas e na precisão geométrica e dimensional das peças fabricadas. (KULKARNI e DUTTA, 1996). A Figura 4 representa os tipos de fatiamento citados.

Figura 4 – Fatiamento uniforme (a) e adaptativo (b)



Fonte: GIORDANO (2012).

O equipamento responsável pela fabricação das peças recebe os dados para construir o modelo, gerados pelo programa de planejamento,

onde estão contidas as trajetórias a serem percorridas depositando material e as estruturas de suporte, calculadas pelo *software* (FOGGIATTO *et al.*, 2009).

Por fim, conforme mostrado na Figura 1, as peças são submetidas a uma etapa de finalização, que compreende operações de pós-processamento que visam a remoção de estruturas de suporte, cura de uma resina, limpeza da peça, ou ações para conferir maior resistência ao componente fabricado. Após o pós-processamento, uma etapa de acabamento pode ser realizada com o objetivo de adequar a peça a uma aplicação final. No acabamento são realizadas opções como: pintura, revestimento, texturização, colagem, usinagem, entre outros (VOLPATO *et al.*, 2007; RAULINO *et al.*, 2013).

Para exemplificar uma situação que visa melhorar o acabamento de peças, foi selecionado o procedimento realizado por Azevedo (2013), que consistiu em suavizar a aparência das superfícies geradas em uma peça construída em ABS por um processo de manufatura aditiva por extrusão. O autor fez um tratamento das superfícies utilizando reação com acetona. A Figura 5 (a) e (b) mostra, respectivamente, a comparação entre a peça antes e depois do tratamento.

Figura 5 – Tratamento das superfícies de peças em ABS fabricadas por manufatura aditiva por extrusão, (a) sem tratamento e (b) com tratamento.

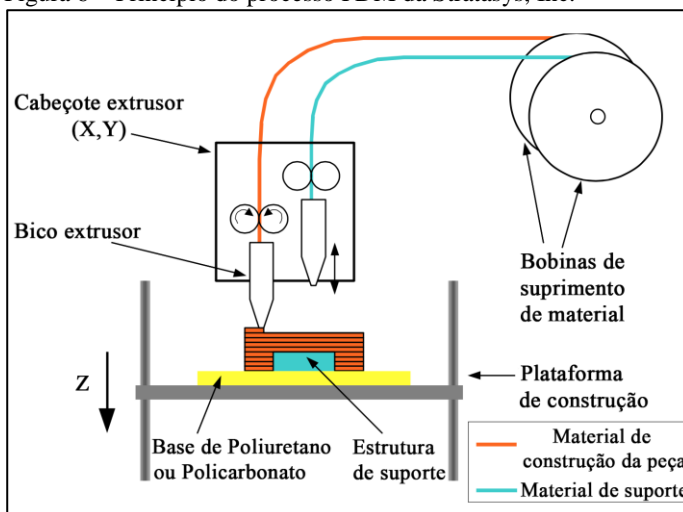


Fonte: Adaptado de AZEVEDO (2013).

2.2 MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO

A tecnologia de manufatura aditiva por extrusão mais difundida é o processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) desenvolvido pela empresa Stratasys®. A patente do processo foi atribuída ao fundador das Stratasys®, Scott Crump em 1992 (GIBSON *et al.*, 2010). O princípio de funcionamento do processo, com base no modelo original desenvolvido pela empresa, é representado na Figura 6.

Figura 6 – Princípio do processo FDM da Stratasys, Inc.



Fonte: Adaptado de VOLTATO *et al.* (2005).

A matéria prima, um termoplástico, encontra-se na forma de filamentos enrolados em uma bobina. Um sistema formado por um par de polias é responsável por tracionar o filamento da bobina e empurrá-lo por um canal aquecido, até atingir um estado semi-líquido ou pastoso. O próprio filamento sendo tracionado atua como uma espécie de êmbolo no início do sistema de extrusão, com o objetivo de expulsar o material através de um bico com diâmetro calibrado. O cabeçote extrusor percorre uma trajetória, controlado por CNC, ao longo dos eixos X e Y, depositando o filamento gerado pela extrusão sobre a plataforma de construção, que por sua vez desloca-se para baixo ao longo do eixo Z, equivalente a altura de uma camada. No momento em que o filamento depositado entra em contato com o material da superfície da peça que

está sendo construída, este solidifica e adere à camada anterior (KRETSCHKEK, 2012; VOLPATO *et al.*, 2007; STRATASYS, 1992).

Como pode-se observar na Figura 6, há a presença de um segundo bico extrusor, responsável por depositar o material utilizado para estruturas de suporte. Em situações em que existam regiões que não estejam conectadas ao corpo da peça, seja na fabricação das primeiras camadas ou em algum estágio do processo, é necessário a utilização de uma estrutura de suporte. Se não houver suporte, essas regiões não têm apoio e não é possível sua construção, uma vez que o bico depositaria material em um espaço vazio (MAGALHÃES, 2010; VOLPATO *et al.*, 2007).

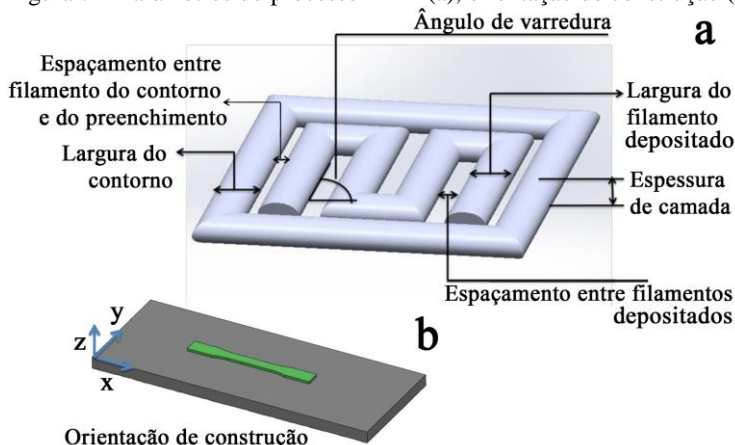
Entre os materiais utilizados no processo FDM pode-se citar: ABS, ABS-M30, ABS-M30i, PC, PC-ISO, PPSF, ULTEM™ 9085 (NEWELL, 2013; ANAND, 2010).

2.2.1 Parâmetros e estratégias de preenchimento: processo FDM

Os produtos finais obtidos pelo processo de modelagem por fusão e deposição, podem ser descritos por índices técnicos — como a resistência a tração, flexão e impacto, a precisão dimensional e de forma —, ou por índices econômicos — como tempo de fabricação e quantidade de material de construção e suporte utilizados —. Tais índices são influenciados pelos parâmetros de processo, ou mais especificamente um conjunto deles, os quais podem ser controlados direta ou indiretamente pelo usuário do processo (GÓRSKI *et al.*, 2013).

Segundo Hossain *et al.* (2013) os principais parâmetros que controlam a construção dos modelos no processo FDM, Figura 7, são: orientação de construção, ângulo de varredura, espessura de camada, largura de varredura, largura de contorno, número de contornos, espaçamento entre varreduras e entre contornos e varredura. É importante ressaltar que o termo varredura (*raster*), corresponde pelo filamento depositado pela extrusão do processo FDM (BRANDÃO e SANT'ANNA, 2005).

Figura 7 – Parâmetros do processo FDM (a), orientação de construção (b).



Fonte: Adaptado de Hossain *et al.* (2013).

Os parâmetros ilustrados na Figura 7, são descritos a seguir:

- a) orientação de construção (Figura 7, b): equivale à orientação da peça na plataforma de construção em relação aos seus respectivos eixos X, Y e Z, onde X e Y são considerados paralelos à plataforma de construção e ao eixo Z ao longo da direção de construção da peça (SOOD *et al.*, 2011);
- b) espessura de camada (*layer thickness*): reconhecida como a altura de cada camada, medida ao longo da direção Z, depositada a partir do bico extrusor (KHAN e SHAIKH, 2014; ALHUBAIL *et al.*, 2013). Este parâmetro está relacionado ao tipo de bico utilizado (SOOD *et al.*, 2009);
- c) largura do filamento (largura de varredura — *part raster width* ou *road width*): caracteriza-se pela largura utilizada no preenchimento da parte interna da fatia delimitada pelo contorno (FOGGIATTO, 2005). Relacionada ao tamanho do bico, o usuário pode selecionar a largura de varredura dentro de uma faixa recomendada (ZIEMIAN e CRAWN, 2001). A variação da espessura de camada teria muito provavelmente o mesmo efeito da variação da largura dos filamentos depositados (NANCHARAIHA *et al.*, 2010);
- d) largura do contorno (*contour width*): define a largura do perímetro (contorno) que delimita a geometria da fatia (LAM, 2008);

- e) número de contornos (*number of contours*): corresponde ao número de perímetros construídos em torno da peça, externos e internos (DOMINGOS-ESPIN *et al.*, 2014);
- f) ângulo de varredura (*raster angle*): é a direção em que as varreduras encontram-se em relação ao eixo X da plataforma de construção (SOOD *et al.*, 2011);
- g) espaçamento entre filamentos depositados (*raster to raster air gap* ou *air gap*): distância entre dois filamentos adjacentes na mesma camada. Por padrão este valor é zero, o que significa que os filamentos irão apenas se tocar. Um espaçamento positivo faz com as varreduras encontrem-se distantes uma da outra. Por outro lado uma folga negativa indica que os filamentos irão se sobrepor, o que resulta em uma estrutura mais densa e requer um maior tempo de construção (AHN *et al.*, 2002);
- h) espaçamento entre filamento do contorno e do preenchimento (*raster to contour air gap* ou *air gap between contours and rasters*): controla a distância entre os filamentos do contorno externo e os de preenchimento interno da peça. Seu valor padrão é zero, sendo assim eles se tangenciam. Sendo negativo, significa interferência (sobreposição), já valor positivo reflete em um espaçamento entre eles (FOGGIATTO, 2005).

Além dos parâmetros descritos acima, as temperaturas de extrusão e envelope, também se apresentam como importantes fatores no processo FDM. Que correspondem respectivamente às temperaturas ajustadas no bico de extrusão da máquina e no interior da câmara de construção do equipamento (MAGALHÃES, 2010).

Segundo Bellini (2002), a temperatura de extrusão é ajustada de acordo com as propriedades reológicas (por exemplo, a dependência da viscosidade pela temperatura) e com a temperatura de fusão do material termoplástico. O ajuste é baseado na relação de compromisso entre três necessidades: (i) de uma baixa viscosidade do material fundido na região de aquecimento, a fim de facilitar a extrusão através do bico, (ii) de amolecer a camada previamente depositada para assegurar a força de união entre camadas, (iii) de maior viscosidade na deposição, para garantir um filamento depositado que se suporte com propriedades de adesão suficientes.

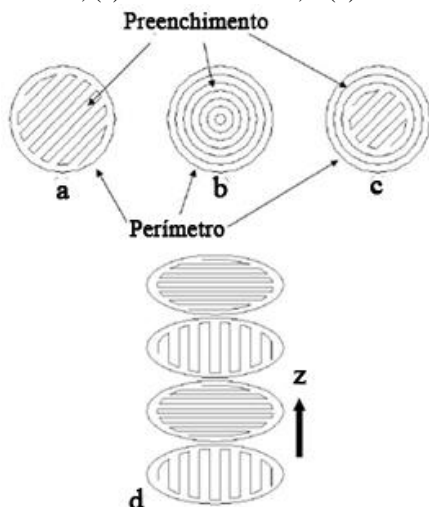
A temperatura de envelope é determinada de acordo com o material utilizado (YUAN, 2008) e tem como efeito principal reduzir as deformações nas peças fabricadas por FDM, causadas pelas variações de

temperatura durante a construção. Outro parâmetro do processo FDM é a velocidade de deposição, ou de impressão (*print speed*) (STEPHEN *et al.*, 2013 a). Segundo os autores, a velocidade de impressão (*print speed*) é a velocidade linear com que bico se movimenta ao construir as peças. De acordo com Chua *et al.* (2010), o processo de construção na tecnologia FDM é lento, pois a velocidade de construção é limitada pela taxa de extrusão, ou fluxo de material, pelo cabeçote extrusor.

No processo FDM, a construção de cada camada tem início com a determinação do perímetro da seção transversal da peça. O perfil deve ser um contorno fechado, onde os pontos inicial e final devem ser coincidentes. Depois de concluído o perímetro, o preenchimento interno da peça é feito. Tal preenchimento interno pode ser realizado, comumente, de três formas, descritas a seguir (LIMA, 2009):

- a) *raster* : caracterizada pelo preenchimento utilizando uma trajetória em zig-zag, onde os filamentos depositados encontram-se paralelos uns aos outros (Figura 8, a);
- b) *contour*: o preenchimento interno é realizado por vários ciclos equidistantes depositados, conforme o perímetro ou perfil da camada (Figura 8, b);
- c) *contour e raster*: consiste na combinação das duas estratégias em cada camada (Figura 8, c).

Figura 8 – Estratégias de preenchimento no processo FDM, (a) *raster* , (b) *contour*, (c) *contour e raster* , e (d) camadas alternadas em 90°.



Fonte: VOLPATO *et al.*, (2007).

Segundo Volpato *et al.* (2007), a estratégia do tipo *raster* é a mais utilizada por apresentar maior velocidade de construção, e conforme mostrado na Figura 8 (d) a direção do *raster* é alternada em 90° de uma camada para a outra, com o objetivo de garantir maior resistência mecânica das peças produzidas.

2.2.2 Fluxo de material

Além de largura e espessura de camada, velocidade do cabeçote e estratégia de preenchimento, outros parâmetros de construção, requerem otimização para um processo livre de defeitos (AGARWALA *et al.*, 1996). A maioria dos parâmetros está relacionada ao fluxo de material e ao movimento do cabeçote. Um ajuste falho desses dois fatores pode resultar em defeitos às propriedades estruturais das peças.

O controle preciso do fluxo de material no cabeçote extrusor é um importante fator para a qualidade das peças. Um sistema extrusor com preciso controle do fluxo de plástico deve ter uma taxa de vazão na saída do sistema, igual a que foi comandada, porém essa condição não é cumprida em todos os momentos (LANGFORD, 2012).

De acordo com Gibson *et al.* (2010), o controle da extrusão é um compromisso complexo, que depende de um número significativo de parâmetros, os quais incluem:

- a) pressão de entrada: esta variável muda regularmente ao longo do processo de construção, já que está relacionada a outros parâmetros de controle. Alterações na pressão de entrada, ou na força aplicada sobre o material, resultam em mudanças na taxa de deposição correspondente;
- b) temperatura: manter a temperatura constante ao fundir o material seria o ideal. No entanto, pequenas flutuações são inevitáveis e influenciarão nas características de deposição. O controle de temperatura na região de aquecimento deve ser realizado a fim de que um ajuste na pressão de entrada possa compensar as variações térmicas. Desta maneira, se a temperatura aumentar, a pressão deve diminuir para manter a mesma taxa de deposição;
- c) diâmetro do bico: este fator é constante para um determinado tipo de construção, mas muitos sistemas baseados em extrusão permitem a troca de bicos, que podem ser utilizados para compensar velocidade em vez de precisão;

- d) características do material: idealmente os modelos de controle devem conter dados sobre o material utilizado, o que inclui informações sobre a viscosidade do material, que irão ajudar na compreensão do fluxo de material através do bico. Já que características como fluxo viscoso, deformações, entre outras, são muito difíceis de prever, início e fim precisos da deposição podem ser difíceis de alcançar;
- e) gravidade e outros fatores: mesmo não sendo aplicada uma pressão na câmara, é possível que o material ainda seja depositado, já que a massa de material fundido causa pressão no cabeçote. O efeito pode ser aumentado, por pressão gasosa formada dentro do sistema, se este for lacrado. Tensão superficial do material e forças de arraste nas superfícies internas do bico podem reduzir esse efeito;
- f) temperatura nas peças: as peças começam a resfriar assim que o material é extrudado. No entanto, diferentes geometrias resfriam a taxas diferentes. Peças grandes e maciças seguram mais o calor do que as pequenas e finas, devido às variações na superfície em relação ao volume. Tal comportamento pode influenciar o ambiente ao redor e afetar o controle da máquina.

Considerando esses fatores, pode-se obter um melhor controle da deposição e da precisão final da peça. Outros fatores, incontroláveis e marginalmente controláveis, podem gerar problemas no controle preciso da deposição. Muitos sistemas baseados em extrusão exigem, por exemplo, a limpeza periódica dos bicos, para prevenir o excesso de material aderido na ponta dos mesmos (GIBSON *et al.*, 2010).

Segundo Langford (2012) o próprio filamento termoplástico usado para construir as peças apresenta um efeito significativo sobre as variações no fluxo de material em um cabeçote extrusor FDM. O filamento é responsável por erros no fluxo volumétrico — ou seja, erros que resultam em discrepâncias entre o fluxo de material desejado e o fluxo na saída — de duas maneiras: a primeira pela variação no diâmetro do filamento, e, a segunda, relacionada à diferença entre o diâmetro da entrada do extrusor e o diâmetro de saída do filamento.

O autor referencia a patente da Stratasys (2005) para provar que o diâmetro do filamento contribui para o erro no fluxo volumétrico associado ao processo de extrusão. A equação (1) relaciona o movimento médio na zona de fusão da extrusora durante mudanças no

fluxo de material (ΔS_g), o diâmetro médio do filamento (d_t), e o desvio padrão do diâmetro (σ_f).

$$V_{\text{erro}} = \frac{3\pi\Delta S_g\sigma_f d_t}{2} \quad (1)$$

Ou seja, com base na equação, quanto maior o diâmetro do filamento e o desvio padrão do diâmetro, maior erro no fluxo de material. Portanto, deve-se minimizar o diâmetro do filamento usado e escolher filamentos com pequenas e precisas tolerâncias. Além disso, o diâmetro interno do bico aquecido deve ser o mais próximo possível ao diâmetro externo máximo do filamento.

Ainda de acordo com Langford (2012), para se obter fluxo de material preciso, além de melhorar o projeto do extrusor, é necessária a melhora do sistema de controle do mesmo, que pode ser realizada de três maneiras. O modo mais simples é sincronizar a velocidade de movimentação do cabeçote extrusor com a taxa de deposição desejada, em todos os pontos da trajetória.

Outra maneira é usar um sinal de controle modificado, que compense as características de deposição inerentes. O extrusor pode ser movido a velocidade constante, enquanto a taxa de deposição é adaptada e compensa as características de deposição do extrusor.

O terceiro e último modo para se compensar a deposição irregular de material é um controle fechado, ou seja, um sistema de controle em tempo real, que meça o diâmetro do filamento na entrada. Isso permite ao sistema de controle reagir às variações do diâmetro do filamento e evitar, o quanto possível, excesso ou falta de deposição.

Bellini (2002) também relaciona a influência da velocidade de movimentação do cabeçote no fluxo de material. De acordo com a autora, a velocidade do cabeçote varia consideravelmente durante a trajetória de construção, acelerando no início e desacelerando no final, e o fluxo de material fundido no sistema de aquecimento varia de acordo com a velocidade, para que a taxa de deposição se mantenha constante. A disparidade entre velocidade do cabeçote e fluxo resulta em muita ou pouca deposição, o que leva aos denominados defeitos *start-stop*, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Efeito *start-stop*.



Fonte: Adaptado de BELLINI (2002).

O fluxo de material pelo bico é responsável por controlar a largura dos filamentos depositados (AHN *et al.*, 2002). As dimensões do filamento (largura e espessura), junto com a velocidade do bico, determinam a taxa de deposição do material a ser extrudado (YUAN, 2008).

Turner *et al.* (2014) citam quatro variáveis como responsáveis pelo fluxo de material no sistema de deposição, e portanto, as dimensões do filamento extrudado (isto é, a resolução da peça fabricada). São elas: o volume de material fundido no cabeçote, a temperatura de fusão e, consequentemente, a viscosidade e a energia superficial do material fundido.

O filamento depositado se espalha com uma forma oblonga, sendo que sua forma final e taxa de espalhamento dependem da viscosidade do material fundido e da energia relativa entre a superfície do filamento e a superfície sobre o qual foi depositado. A interação entre o bico do cabeçote e o filamento, pode influenciar a posterior evolução do material depositado. A largura final do filamento depositado determina a resolução que pode ser alcançada pelo processo, como também a área de contato entre filamentos adjacentes. O formato oblongo e arredondado do filamento conduz inevitavelmente, a formação de pequenos vazios na peça. A resistência da união entre os filamentos depositados e as propriedades mecânicas gerais das peças dependem da área de contato entre os filamentos e do tamanho dos vazios (TURNER *et al.*, 2014).

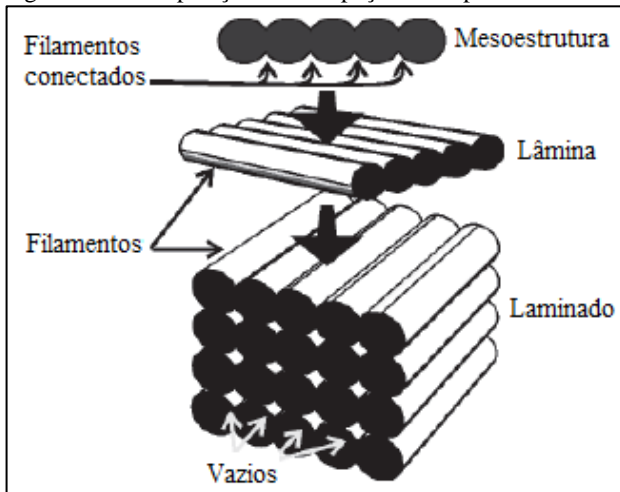
2.2.3 Qualidade das peças produzidas por FDM

2.2.3.1 União entre filamentos depositados

Os componentes obtidos pelo processo FDM são compósitos de filamentos poliméricos conectados, e vazios (LI *et al.*, 2002 a). A estrutura interna de uma peça fabricada por FDM se assemelha a uma estrutura compósita de fibras reforçadas. Os filamentos individuais são mais resistentes na direção axial, como as fibras de um compósito. No entanto, as peças apresentam um comportamento mais fraco na região de adesão filamento-filamento ou entre as camadas (BELLINI e GÜÇERI, 2003).

Ao se associar um componente obtido por FDM a um compósito, em um nível macro, as propriedades são estudadas como laminados com lâminas conectadas, Figura 10. Em um nível micro, as propriedades de cada lâmina estão em função das características dos filamentos, da qualidade da adesão entre os filamentos, e da densidade de vazios (BELLEHUMEUR *et al.*, 2004).

Figura 10 – Composição de uma peça obtida por FDM.

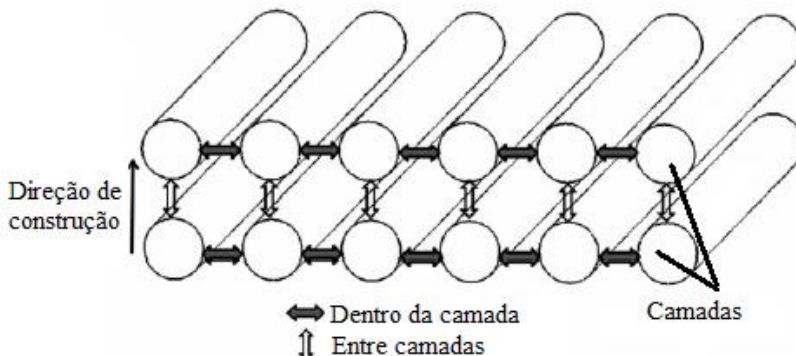


Fonte: Adaptado de BELLEHUMEUR *et al.* (2004).

A união entre os filamentos ocorre de duas maneiras (Figura 11): (i) dentro das camadas (*intra layer*), isto é, na união entre filamentos adjacentes pertencentes à mesma camada; (ii) adesão entre camadas

(*inter layer*), ou seja, na união entre duas camadas sucessivas (GURRALA e REGALLA, 2014).

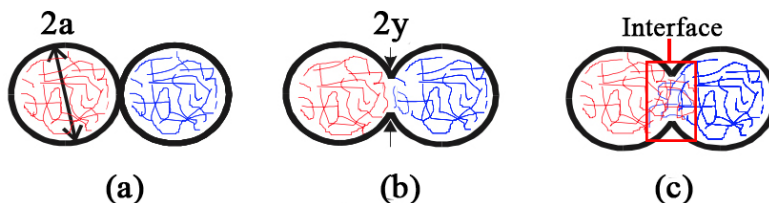
Figura 11 – União entre camadas, e na mesma camada.



Fonte: Adaptado de GURRALA e REGALLA (2014).

De acordo com Bellehumeur *et al.* (2004), a qualidade da união entre os filamentos depositados é um importante fator na determinação da integridade e das propriedades mecânicas das peças resultantes. A formação da união entre os filamentos poliméricos é impulsionada pela energia térmica do material semi-fundido, e a qualidade desta união está relacionada ao crescimento do “pescoço” formado entre filamentos adjacentes, à difusão molecular, e à randomização das cadeias poliméricas na interface, conforme mostrado na Figura 12 (SUN *et al.*, 2008).

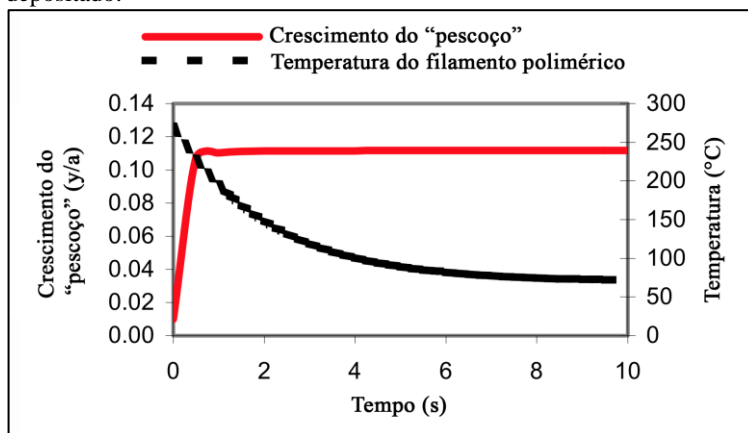
Figura 12 – Processo de formação da união entre dois filamentos: (a) contato superficial; (b) crescimento do “pescoço”; (c) difusão molecular e randomização.



Fonte: Adaptado de SUN *et al.* (2003).

Segundo Li *et al.* (2002, b), quando o filamento é depositado e está em contato com o material circundante, a temperatura na interface encontra-se bem acima da temperatura de transição vítrea; essa condição favorece o rápido desenvolvimento de uma ligação adesiva. Sendo assim, de acordo como os autores, a maior parte do crescimento do “pescoço” entre filamentos adjacentes, Figura 13, ocorre logo após a sua extrusão. Segundo os autores a taxa e o nível de molhamento entre os filamentos poliméricos é altamente dependente das temperaturas de extrusão e envelope, e das condições de convecção. Na Figura 13, o crescimento do pescoço é adimensional (y/a) e calculado pela relação entre o raio do pescoço (y) e o raio do filamento (a) (CHENNAKESAVA e NARAYAN, 2014).

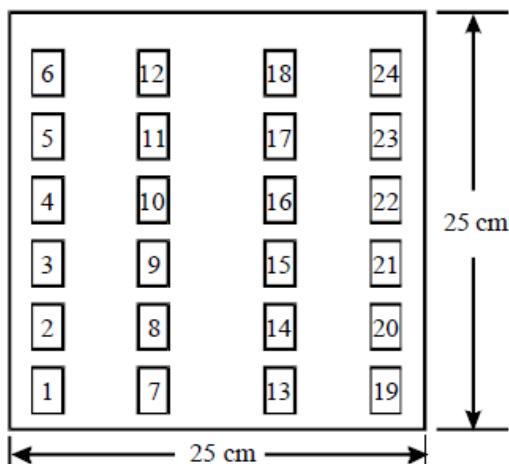
Figura 13 – Crescimento do “pescoço” e temperatura do filamento polimérico depositado.



Fonte: Adaptado de LI *et al.* (2002, b).

Sun *et al.* (2008) verificaram que a temperatura de envelope e as condições de convecção dentro da câmara de construção influenciam significativamente na mesoestrutura e na qualidade geral da resistência de adesão entre filamentos. Os autores fabricaram 24 corpos de prova para ensaio de flexão, simultaneamente, em diferentes regiões da plataforma de construção (Figura 14). O ensaio de flexão foi realizado com o objetivo de avaliar a extensão da interdifusão molecular sob diferentes condições de processamento, e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 1.

Figura 14 – Localização dos corpos de prova na plataforma de construção.



Fonte: Adaptado de SUN *et al.* (2008).

Tabela 1– Resultados obtidos no estudo de Sun *et al.* (2008).

Localização na plataforma	Peça 1	Peça 9	Peça 15
Raio do "pescoço" (μm)	66,4	87,3	79,6
Desvio padrão (μm)	4,82	4,42	3,63
Crescimento do "pescoço" (y/a)	0,54	0,71	0,65
Carga média de ruptura (N)	185,5	233,1	211,3
Desvio padrão (N)	9,78	5,44	7,42

Fonte: Adaptado de SUN *et al.* (2008).

De acordo com Sun *et al.* (2008), foi observado que as peças construídas em uma certa região da plataforma de construção apresentavam um melhor acabamento das superfícies e sem falhas entre os filamentos adjacentes, se comparado a outros locais da plataforma. Os experimentos (ensaios de flexão) realizados pelos autores apresentaram grande variabilidade, conforme mostrado na Tabela 1, atribuída às variações nas condições de resfriamento com as mudanças no local de construção das peças.

Os perfis de temperatura variam consideravelmente com a mudança do local de construção. As variações no histórico térmico de cada peça podem, segundo os autores, ter influenciado tanto na mesoestrutura como na qualidade da união entre os filamentos. No equipamento utilizado para a pesquisa, FDM 2000, o controle da

temperatura na câmara de construção (envelope) é feito por aquecimento e pela circulação de ar fechado.

A temperatura na câmara de construção, segundo as medições realizadas por Sun *et al.* (2008), mostra que a temperatura no envelope de construção é homogênea, porém o fluxo de ar na câmara nem se aproxima da homogeneidade. Sendo assim, o fluxo se torna sensível ao local de construção na plataforma, afetando o coeficiente de convecção na superfície das peças.

Bellini (2002) considera que a temperatura de envelope é um fator importante para que se tenha forte união entre os filamentos da mesma camada, e entre as camadas. Uma vez que a adesão entre os filamentos termoplásticos caracteriza-se por um elemento básico na determinação das propriedades mecânicas das peças, a temperatura de envelope deve ser mantida a mais alta possível para que resistência da união entre os filamentos seja maior.

Sood *et al.* (2010) investigaram a influência de cinco parâmetros de processo — espessura de camada, largura do filamento, ângulo de varredura, orientação e espaçamento entre os filamentos — sobre a resistência mecânica de peças fabricadas por FDM. Os resultados encontrados pelos autores evidenciaram que a baixa resistência atribuída às peças analisadas estava relacionada a distorções dentro e entre as camadas.

Em relação à influência dos parâmetros de processo, Sood *et al.* (2010) descreveram:

- a) o número de camadas em uma peça depende da espessura de camada e da orientação de construção. Se o número de camadas é grande, resulta em um alto gradiente de temperatura na direção inferior da peça. O efeito promoverá o aumento da difusão entre filamentos adjacentes, e, portanto, a resistência da peça tende a melhorar. Porém um alto gradiente de temperatura é responsável por distorções dentro das camadas ou entre estas. O aumento do número de camadas, também aumenta o número de ciclos de aquecimento e resfriamento, e assim o acúmulo de tensões residuais cresce, o que pode resultar em distorções, fissuras entre camadas, delaminação e outros defeito de fabricação;
- b) ângulos de varredura pequenos não são preferíveis, uma vez que irão resultar em filamentos longos, o que promoverá o acúmulo de tensões ao longo da direção de construção, gerando distorções e baixa adesão entre os filamentos depositados. Ângulos menores, porém, resultam em

- filamentos mais inclinados ao longo da direção de carga, oferecendo mais resistência;
- c) filamentos grossos resultam em acúmulo de tensões ao longo da largura da peça e têm o mesmo efeito ao longo do filamento. O acúmulo de tensões resulta em alta temperatura próxima às superfícies de adesão, o que pode aumentar a difusão e resultar em uniões resistentes;
- d) um espaçamento entre os filamentos (*gap*) igual a zero resulta em melhor difusão entre filamentos adjacentes, mas também pode reduzir a dissipação de calor e reduzir a área total de adesão.

De acordo com Domingos–Espin *et al.* (2014) a espessura de camada afeta a adesão entre as camadas, enquanto a largura dos filamentos depositados influencia principalmente a qualidade da adesão entre os filamentos da mesma camada. Se o diâmetro do filamento extrudado é menor, o gradiente de temperatura entre o interior e o exterior da peça é menor, e consequentemente a qualidade da união entre os filamentos da mesma camada é menor. De maneira geral, segundo os autores, quando a união entre as camadas não é boa em função da espessura de camada, a adesão entre os filamentos da mesma camada é melhor, e vice e versa.

2.2.3.2 Comportamento mecânico de peças obtidas por FDM

As propriedades mecânicas de componentes fabricados por FDM são governadas por sua mesoestrutura, que por sua vez, é controlada por parâmetros de processo como, por exemplo, largura dos filamentos, espessura de camada, ângulo de varredura, e espaçamentos entre filamentos (*gap*) (LI *et al.*, 2002 a).

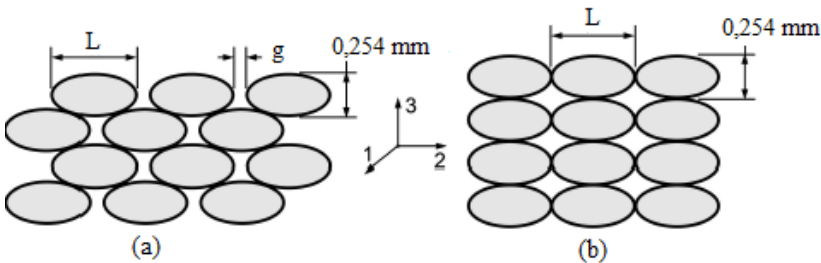
Segundo Bellini e Güçeri (2003), peças produzidas em um processo de adição de camadas apresentam estruturas com propriedades anisotrópicas³. As propriedades e o desempenho de peças finais fabricadas por FDM, de acordo com os autores, são influenciados pela forma do filamento depositado, a interação filamento-filamento, mas,

³ Anisotropia é uma das principais características de um sistema de manufatura aditiva, o que indica que o material de uma peça apresenta diferentes propriedades mecânicas para cada eixo de construção. A anisotropia é mais evidente no eixo Z de construção, a agregação resultante entre as camadas neste eixo, é mais frágil do que a agregação de material na mesma camada, isto é, eixos X e Y (VOLPATO *et al.*, 2007).

principalmente, pelo comportamento mecânico. As propriedades mecânicas, segundo Bellini e Güçeri (2003), dependem fortemente de dois importantes fatores: orientação de construção e a estratégia de preenchimento em cada camada.

De acordo com Rodriguez *et al.* (2000) a mesoestrutura de peças obtidas por FDM é caracterizada por uma densidade de vazios e pela existência de ligações filamento-filamento, tanto entre camadas como na mesma camada. A geometria dos vazios e a extensão da união entre filamentos individuais são fatores determinantes sobre a anisotropia e a magnitude da resistência desenvolvida pelas peças. Segundo os autores, as características citadas anteriormente são uma função dos seguintes parâmetros de processo: temperatura de extrusão e envelope; espaçamento entre filamentos (*gap*), fluxo de material, e a configuração de translação entre as camadas. Para o estudo os autores propuseram amostras com duas configurações de translação entre as camadas, Figura 15, sendo: desalinhada (a) e alinhada verticalmente (b).

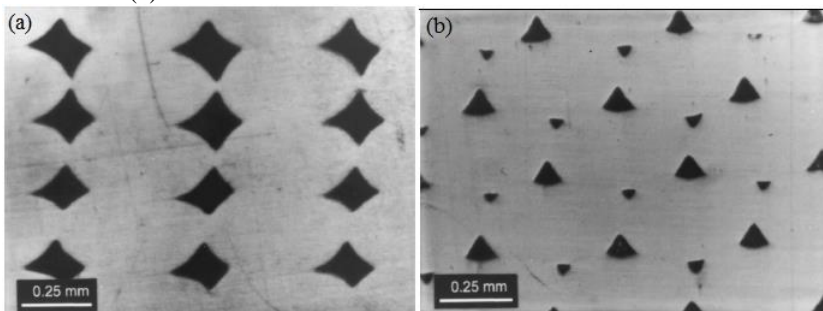
Figura 15 – Configurações de mesoestrutura para peças em ABS unidirecionais, (a) desalinhada e (b) alinhada.



Fonte: Adaptado de RODRIGUEZ *et al.* (2000).

Segundo os autores a condição ideal para uma peça em FDM seria com menor densidade de vazios e maior densidade de adesão entre filamentos, o que produziria componentes com melhores propriedades mecânicas. A Figura 16 representa respectivamente duas configurações de mesoestrutura, alinhada (a) e desalinhada em (b), obtidas.

Figura 16 – Mesoestrutura gerada com as configurações alinhada (a) e desalinhada (b).

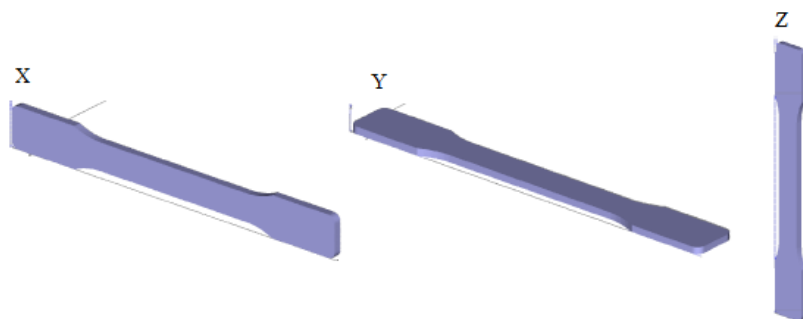


Fonte: Adaptado de RODRIGUEZ *et al.* (2000).

A mesoestrutura gerada com a configuração desalinhada (Figura 16, b) apresenta uma menor densidade de vazios, se comparada à configuração alinhada (Figura 16, a), e assim fornece uma maior resistência à peça final. Rodriguez *et al.* (2000) concluíram que entre os parâmetros citados anteriormente, o espaçamento entre os filamentos (*gap*) e o fluxo de material tem forte influência sobre a densidade e a geometria dos vazios, e sobre a extensão da adesão entre os filamentos adjacentes.

Bagsik *et al.* (2010) avaliaram a resistência mecânica de peças fabricadas por FDM, variando a orientação de construção das amostras em X, Y e Z (Figura 17), e mantendo os demais parâmetros de processo na configuração *default* do *software* de planejamento do processo.

Figura 17 – Orientação de construção das amostras, estudo de Bagsik *et al.* (2010).

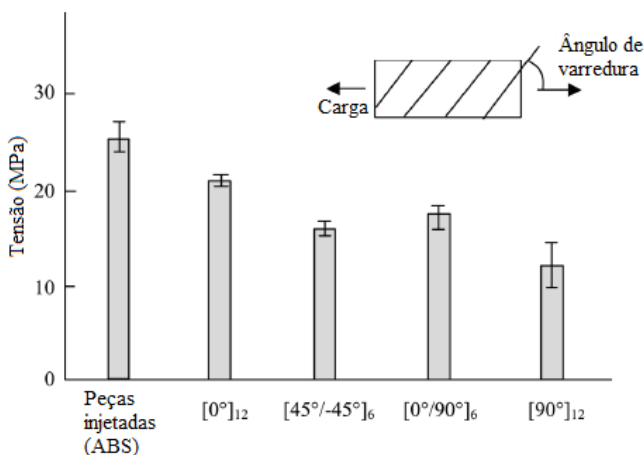


Fonte: Adaptado de BAGSIK *et al.* (2010).

Conforme mostrado na Figura 17 as amostras foram fabricadas para ensaio de tração. Os resultados obtidos indicaram que as amostras fabricadas na direção X apresentaram os melhores resultados com uma resistência a tração de 63 MPa, seguido pelas amostras construídas nas direções Y (46 MPa) e Z (41 MPa).

Ahn *et al.* (2002) verificam em seu estudo que o espaçamentos entre os filamentos (*gap*) e o ângulo de varredura, são parâmetros que afetam significativamente a resistência a tração de peças fabricadas em ABS por FDM. De acordo com os autores os melhores resultados são obtidos quando os filamentos encontram-se orientados ao longo da direção da carga (0°), e o espaçamento entre os filamentos é negativo, uma vez que aumenta a resistência e a densidade das peças. A Figura 18 mostra os resultados para o ensaio de tração realizado no estudo de Ahn *et al.* (2002).

Figura 18 – Resistência à tração das peças, em relação ao ângulo de varredura e *gap* negativo.



Fonte: Adaptado de AHN *et al.* (2002).

Lužanin *et al.* (2014) investigaram a influência dos parâmetros de processo, espessura de camada, ângulo de varredura e a quantidade de material no preenchimento (*infill*)⁴, sobre a resistência máxima à flexão

⁴ O preenchimento define a densidade de material no interior do objeto. O parâmetro é ajustado percentualmente, sendo que um ajuste de 100 % significa que a densidade de material no interior do objeto é máxima. Em contrapartida, um valor 0% indica uma peça oca (BRATL, 2013).

dos componentes fabricados por FDM. No experimento realizado, cada um dos parâmetros foi variado em três níveis, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros e níveis utilizados no experimento.

Fatores	Unidade	Nível baixo	Nível central	Nível alto
Espessura da camada	[mm]	0,1	0,2	0,3
Ângulo de varredura	[°]	0	30	60
Preenchimento	[%]	10	20	30

Fonte: Adaptado de LUŽANIN *et al.* (2014).

De acordo com os autores, a espessura de camada foi o parâmetro mais significativo sobre o efeito analisado. Apesar de o ângulo de varredura e a quantidade de material no preenchimento, individualmente não serem relevantes, a interação entre eles foi influente na resistência máxima à flexão.

Com relação à espessura de camada, segundo os autores, os maiores valores de resistência obtidos estavam relacionados às situações onde o valor mínimo de espessura foi aplicado. À medida que a espessura de camada aumentou do nível baixo para o alto, a resistência máxima a flexão diminuiu cerca de três vezes.

Albuquerque (2014) avaliou também a resistência mecânica de peças em PLA, fabricadas por um equipamento RepRap. As propriedades mecânicas foram analisadas em ensaios de tração, buscando evidenciar as variáveis que influenciassem neste comportamento. Para tal o autor selecionou quatro parâmetros de processo: resfriamento das camadas depositadas, velocidade de impressão, temperatura da base (plataforma de construção), e temperatura de extrusão. As peças foram fabricadas com um preenchimento de 100%, a fim de se obter, segundo o autor, uma peça maciça.

Segundo o autor a escolha dos parâmetros avaliados se baseou nos seguintes critérios: (i) as duas temperaturas, de extrusão e da base, e seus ajustes corretos, pois são problemas comuns dos usuários RepRap; (ii) se a temperatura de extrusão mínima para processar o PLA já é suficiente, ou há a necessidade de temperaturas mais elevadas; (iii) se é melhor imprimir com a base fria (na temperatura ambiente) ou com a base aquecida (em torno da T_g do polímero); (iv) a velocidade de impressão, assim como o resfriamento das camadas, foram variados com

o objetivo de verificar se teriam influência sobre o tempo de resfriamento das camadas depositadas e, portanto, na qualidade da união entre as mesmas. Os níveis atribuídos aos parâmetros utilizados no estudo são apresentados na Tabela 3.

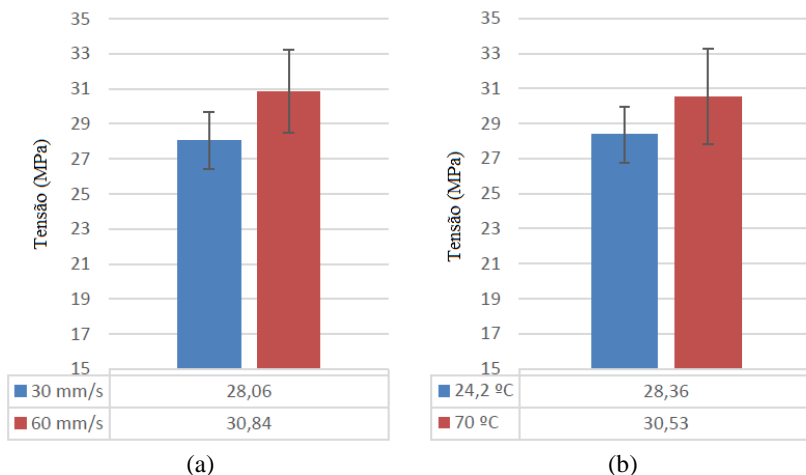
Tabela 3 – Parâmetros de processo e níveis associados, Albuquerque (2014).

Parâmetros	Nível (-)	Nível (+)
Resfriamento das camadas (%)	0	100
Velocidade de impressão (mm/s)	30	60
Temperatura da base (°C)	24,2	70
Temperatura de extrusão (°C)	195	215

Fonte: Adaptado de ALBURQUEQUE (2014).

Com os resultados obtidos nos ensaio de tração e o tratamento estatístico realizado, o autor identificou que, entre os parâmetros avaliados, a velocidade de impressão e a temperatura da base apresentaram influência significativa sobre os valores de tensão, e os melhores resultados foram para os níveis de 60 mm/s e 70°C, Figura 19 (a) e (b). Ainda de acordo com o autor o resfriamento das camadas e a temperatura de extrusão (principalmente), não foram significativos.

Figura 19 – Resultado do ensaio de tração em relação à velocidade de impressão (a) e temperatura da base (b).



Fonte: Adaptado de ALBUQUERQUE (2014).

Em uma análise nível a nível, para cada parâmetro de processo avaliado, Albuquerque (2014) definiu as melhores condições de construção, Tabela 4, ou seja, as que geraram os melhores resultados em relação às propriedades mecânicas.

Tabela 4 – Melhores condições de construção, Albuquerque (2014).

Parâmetro	Nível
Resfriamento das camadas	100 %
Velocidade de impressão	60 mm/s
Temperatura da base	70 °C
Temperatura de extrusão	195 °C

Fonte: Adaptado de ALBUQUERQUE (2014).

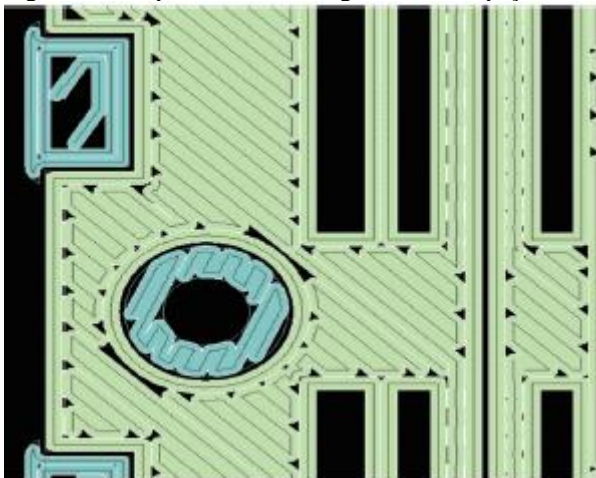
Com relação às temperaturas de processo, extrusão e base, o autor propõe que há uma relação de compromisso entre os níveis em que as variáveis se encontram. Ao fixar a temperatura de extrusão em 195 °C e variar a temperatura da base de 24,5 °C para 70 °C, a tensão média aumenta de 27,42 MPa para 31,75 MPa (crescimento de 15,8 %), enquanto que ao manter constante a temperatura de extrusão em 215 °C e realizar a mesma variação na temperatura da base, o incremento na tensão foi de 0,03 %.

De acordo com o autor, as condições de temperatura — 70 °C e 195 °C, para as temperaturas da base e extrusão, respectivamente — que melhoraram a resistência mecânica das peças podem estar relacionadas a fatos como a melhor adesão entre as camadas, favorecida pela temperatura da base em torno da T_g do PLA, e a degradação do filamento no extrusor.

2.2.3.3 Defeitos internos em peças produzidas por FDM

As peças produzidas pelo processo FDM estão sujeitas a defeitos causados pelas características construtivas da tecnologia e o conhecimento a respeito desses defeitos é importante para reduzir seus efeitos (FOGGIATTO, 2005). A construção camada a camada, segundo Gajdoš e Slota (2013), forma áreas sem preenchimento dentro de praticamente todas as camadas, e entre as camadas da peça. Isso resulta em falta de homogeneidade estrutural nos modelos, Figura 20.

Figura 20 – Superfície não homogênea de uma peça fabricada em camadas.



Fonte: GAJDOŠ e SLOTA (2013).

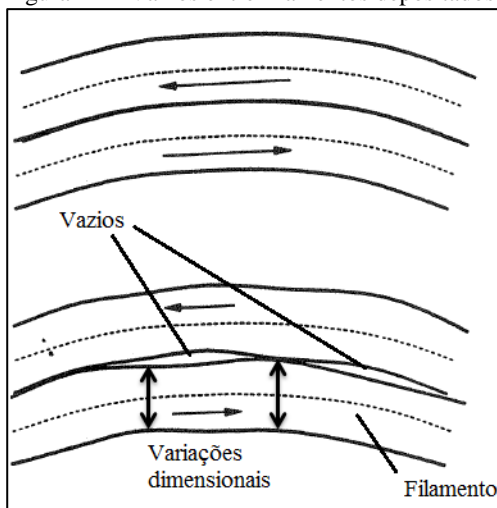
A ocorrência de defeitos internos nas peças é classificada por Agarwala *et al.*, (1996), Weeren *et al.* (1995), e Huang, (2014):

Vazios no interior dos contornos: são causados pelo preenchimento incompleto da área dentro do perímetro da peça. No ponto onde a trajetória do cabeçote se aproxima do perímetro a direção do cabeçote é alterada para um caminho tangente ao perímetro. O resultado é um fluxo insuficiente de material para preencher o volume nas interseções, levando a vazios. Os métodos para resolver vão desde dar um espaçamento negativo ao perímetro e ou aumentar a taxa de deposição nos pontos de interseção.

Defeitos entre filamentos depositados: podem ocorrer de duas formas. A primeira, com a presença de vazios entre eles e variações das dimensões dos filamentos depositados, Figura 21, causados pelo fluxo inconsistente de material — resultante do escorregamento do filamento a ser processado no mecanismo de alimentação (conjunto de polias) —, e pelas variações no diâmetro do filamento. A segunda, quando há contato entre os filamentos, mas a união — que depende da temperatura entre eles e do fluxo lateral de material —, entre eles é fraca. Os fatores que causam defeitos entre filamentos depositados citados se caracterizam por:

- a) Escorregamento do filamento: o escorregamento do filamento ocorre devido à incompatibilidade entre o material que compõe a superfícies das polias e o filamento ou erros na profundidade das ranhuras nas polias. A energia térmica insuficiente, e consequentemente condições adversas de temperatura na região aquecida do extrusor, também podem gerar escorregamento do filamento, e deformações no mesmo após sua passagem pelas polias. Além dos fatores descritos, escorregamento pode ser gerado se a viscosidade do material na região de aquecimento do cabeçote for muito elevada, de forma a impedir o filamento de atuar como um êmbolo eficiente na extrusão de material pelo bico.
- b) Diâmetro do filamento não uniforme: quando o diâmetro do filamento diminui, a taxa material extrudado é menor do que o programado. As variações no diâmetro do filamento resultam em pouca deposição, que pode resultar no surgimento de vazios, ou fraca união entre os filamentos depositados.
- c) Comprimento do vetor: ao depositar ao longo do comprimento do vetor, o tempo entre a deposição de dois filamentos adjacentes é alto, e a temperatura do filamento depositado anteriormente cai muito, fazendo com que os filamentos adjacentes não se unam adequadamente.

Figura 21 – Vazios entre filamentos depositados e variações dimensionais.



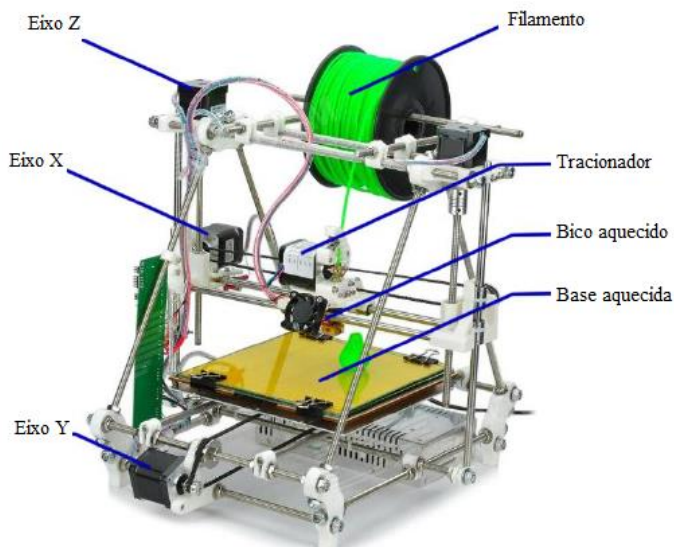
Fonte: Adaptado de WEEREN *et al.*, (1995).

2.3 EQUIPAMENTOS DE IMPRESSÃO 3D BAIXO CUSTO E CÓDIGO ABERTO

No âmbito das máquinas de código aberto, em meados da década de 2000, duas comunidades *on-line* foram criadas para desenvolver e compartilhar o projeto de equipamentos de fabricação 3D. A primeira, em 2005, foi a RepRap iniciada por Adrian Bowyer da Universidade de Bath, no Reino Unido. Em 2006, foi criada a Fab@home, por Hod Lipson e Evan Malone, da Universidade Cornell, Estados Unidos (BARNATT, 2014).

O projeto RepRap (*Replicating Rapid – prototyper*), criado por Bowyer, teve como objetivo levar para as casas a tecnologia de manufatura aditiva, através de uma impressora 3D de código aberto capaz de se autorreplicar, isto é, capaz de produzir peças para a montagem de uma cópia própria (GONÇALVES, 2014; SELLS, 2009). Assim como os equipamentos da Stratasys, as máquinas RepRap são baseadas no princípio de extrusão de filamentos, através de um bico aquecido (DE JONG e DE BRUIJN, 2013). A Figura 22 representa um equipamento RepRap e seus principais elementos.

Figura 22 – Equipamento RepRap e suas partes.



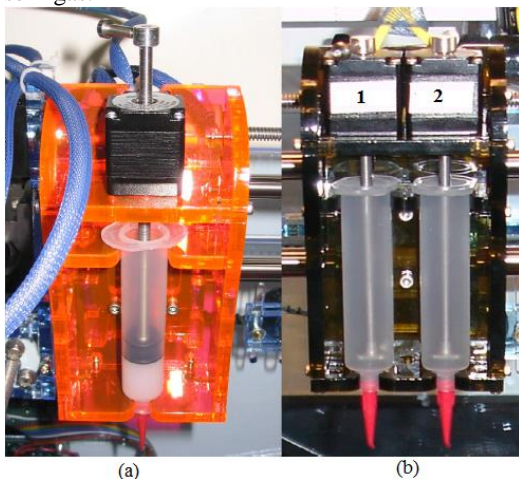
Fonte: Adaptado de AZEVEDO (2013).

Como pode ser observado na Figura 22, as partes que constituem um equipamento do tipo RepRap são basicamente (ALBUQUERQUE, 2014):

- a) cabeçote extrusor: constituído por duas partes, o extrusor e o aquecimento, isoladas termicamente;
- b) fornecimento de material: as impressoras RepRap utilizam material na forma de filamento, com dimensões de 1,75 e 3mm;
- c) base: área de impressão (plataforma de construção), geralmente é uma parte que pode ser aquecida;
- d) eixos: por convenção nas impressoras RepRap, o cabeçote extrusor se encontra montado no eixo X, e a base de impressão no eixo Y.

Assim como o projeto RepRap, o Fab@home buscou difundir ao máximo a tecnologia de manufatura aditiva para curiosos, inventores e empreendedores, criando também um site que possibilitasse aos usuários colaborar para a evolução dos equipamentos (MALONE e LIPSON, 2007). As impressoras Fab@home utilizam seringas para dispensar o material de construção (Figura 23 a e b), permitindo o uso de materiais alimentícios, epóxi, silicones e hidrogéis. Variações nas máquinas proporcionam o uso de cabeçotes com múltiplas seringas, para fabricação com múltiplos materiais (LAN, 2013).

Figura 23 – Sistema de deposição Fab@home (a) uma seringa, (b) duas seringas.



Fonte: Adaptado de MALONE (2007).

Modelos comerciais do equipamento começaram a ser vendidos por membros da comunidade RepRap. Por volta de 2012, empresas fundadas por esses usuários distribuíram milhares de máquinas, com preços até 2500 dólares. A *Bits from Bytes*, de Clevedon, Reino Unido, *Makerbot*, Brooklyn, Nova Iorque e a *Ultimaker*, da Holanda, são exemplos de empresas que foram fundadas por integrantes da comunidade RepRap, que entraram no mercado servindo principalmente artistas, inventores e estudantes (DE JONG e DE BRUIJN, 2013).

Algumas dessas empresas foram adquiridas por grupos maiores do mercado de máquinas FDM, como os casos da *Bits from Bytes* pela *3D Systems* em 2010 (SYSTEMS, 2010), e a *Makerbot* pela *Stratasys* em 2013 (BARNATT, 2014).

O Quadro 2, apresentada no estudo de Pei *et al.* (2011), reúne características técnicas de quatro exemplares de máquinas, correspondente a cada uma das empresas e comunidades *open source* citadas: Rapman 3D (modelo 1) (*Bits from Bytes*), Fab@home (modelo 1), Mendel (RepRap) e a CupCake CNC (*Makerbot*).

Quadro 2 – Características técnicas de quatro sistemas de baixo custo.

Características	Repman 3D	Fab@Home	Mendel	CupCake CNC
Processo	Extrusão	Extrusão baseada em seringa	Extrusão	Extrusão
Posicionamento	Cartesiano (X, Y, Z)	Cartesiano (X, Y, Z)	Cartesiano (X, Y, Z)	Cartesiano (X, Y, Z)
Dimensão máxima de impressão	275 x 205 x 210 mm	203 x 203 x 102 mm	200 x 200 x 140 mm	100 x 100 x 130 mm
Resolução	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,08 mm
Velocidades de impressão	17 mm ³ /s	Depende da fluidez do material	15 cm ³ /h	5000 mm/min (X/Y); 200 mm/min (Z).
Materiais	ABS, HDPE, LDPE, PP, uPVC.	Líquidos ou pastas que possam ser depositadas pela seringa.	ABS, PLA, HDPE, etc.	ABS, PLA, PCL.

Fonte: Adaptado de PEI *et al.* (2011).

Segundo Fonda (2013), as principais diferenças entre as máquinas profissionais e os modelos baixo custos são:

- a) equipamentos profissionais utilizam materiais especiais e, portanto, com custo mais elevado, enquanto máquinas de baixo custo podem utilizar filamentos de plástico de menor custo — ABS, PLA, entre outros —, de fornecedores distintos;
- b) máquinas profissionais dispõem de estruturas sólidas em metal; equipamentos de baixo custo geralmente são constituídos por peças de plástico fabricadas por impressão 3D, ou de madeira cortada a *laser*, dificilmente por partes de alumínio ou aço;
- c) o *software* utilizado para operar um equipamento profissional é proprietário (código fechado) e os fabricantes podem organizar treinamentos especializados para os operados. No caso dos equipamentos de baixo custo, os *softwares* são mais livres e de código aberto, sendo bastante customizáveis, tornando a evolução rápida;
- d) máquinas profissionais são controladas por computadores industriais e sistemas operacionais proprietários; as de baixo custo utilizam extensivamente hardwares abertos como Arduino, Pololu, Sanguinololu, entre outros.

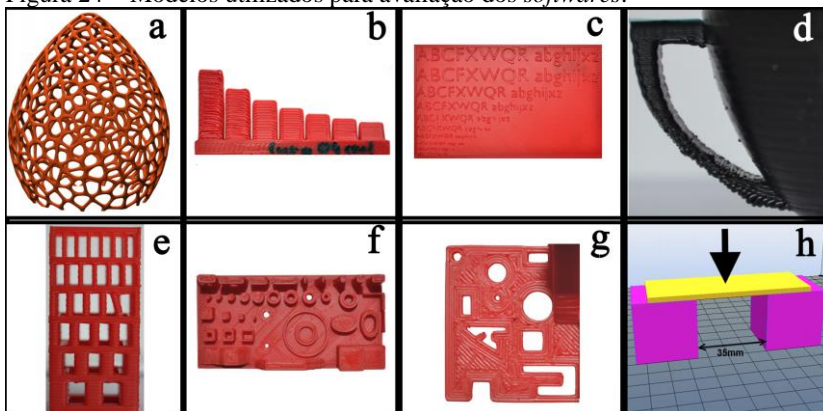
2.3.1 *Softwares* livres para fatiamento

Entre os principais *softwares* livres para o processo de fatiamento de peças, destacam-se: Skeinforge, Slic3r, Cura, KISSlicer, e o MakerWare, todos disponíveis para Windows, Linux e Mac (FONDA, 2013). Bugdayci *et al.* (2014) selecionaram quatro delas (Cura, KISSlicer, Slic3r e Skeinforge) para terem desempenho avaliado durante fatiamento das seguintes peças com estruturas complexas:

- a) Ovo de dragão: peça oca, frágil e com cavidades;
- b) Variação de níveis: peça em degraus;
- c) Texto: peça com letras entre 1 e 6 mm;
- d) Xícara: peça com curva e inclinação acentuada;
- e) Pilares: peça com estruturas finas;
- f) Precisão: peça com diferentes geometrias e dimensões;
- g) Adesão e pontes: peça plana como suporte para diferentes estruturas como torres, pontes e furos;
- h) Resistência: peça plana sem furo e peça plana com furo, levadas à ruptura.

A Figura 24 mostra exemplos de cada uma das estruturas citadas.

Figura 24 – Modelos utilizados para avaliação dos *softwares*.



Fonte: Adaptado de BUGDAYCI *et al.* (2014).

Os resultados obtidos nas análises de Bugdayci *et al.* (2014), são apresentados a seguir:

- a) Cura: ótima opção para usuários iniciantes, ou que precisam de uma ferramenta rápida e fácil. Dispõe de uma interface amigável e fatiamento rápido. Com relação aos modelos propostos para as análises, o *software* apresentou bons resultados para peças com variação de altura, xícara, texto, e precisão. No entanto o Cura apresenta limitações no fatiamento de estruturas finas, como ovo de dragão e pilares. As desvantagens do *software* foram a geração de superfícies rugosas, baixa precisão de impressão, e a ausência de configurações avançadas;
- b) KISSlicer: a melhor opção para usuários avançados, com bons resultados de impressão na maioria dos testes. Apresenta boa precisão, e perfis de configuração separados em impressão, materiais, e suporte. No entanto surgiram falhas pontuais na construção dos pilares, xícara, e na peça com variação de níveis. Como desvantagens apresenta o fato de a versão Pro ser cobrada, e que algumas configurações padrão podem causar problemas;
- c) Slic3r: a melhor opção para usuários comuns que necessitam uma ferramenta grátis. Apresentou ótimos resultados na construção da xícara, gerando superfícies lisas. Nas demais

peças avaliadas, obteve bons resultados. De maneira geral, o software é simples de usar, apresenta grande precisão na impressão, dispõe de uma interface de configuração dividida em ajustes de parâmetros de impressão, material e configurações do equipamento (impressora). Dentre as suas limitações estão a dificuldade de construção de estruturas em diagonais e muito finas; estruturas muito fina podem ser destruídas devido ao contato com o bico aquecido;

- d) Skeinforge: melhor opção para usuários que necessitam de muitas configurações específicas. Uma das principais vantagens do *software*, segundo os autores, é a disponibilização de configurações detalhadas. Os resultados da fabricação das peças ovo de dragão, texto, e finos pilares não foram os melhores encontrados. Apresentou também problemas na construção da xícara. O fatiamento de estruturas finas foi instável. O *software* demonstrou-se difícil de operar, e não dispõe de uma interface amigável, além de apresentar baixa velocidade de fatiamento.

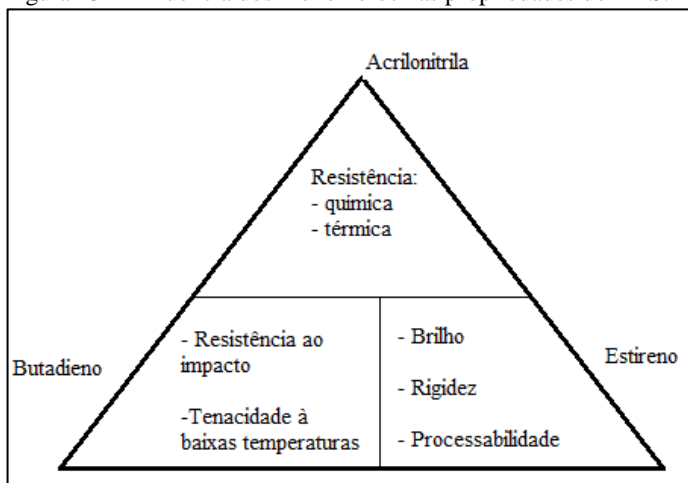
2.3.2 Materiais utilizados em equipamentos de baixo custo e código aberto

2.3.2.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

O ABS é um termoplástico amorfo derivado do petróleo, formado por três monômeros: acrilonitrila, butadieno, e estireno. O material é conhecido por ser um plástico de engenharia com boas propriedades mecânicas que o fazem ter aplicações em diversas áreas da indústria e no uso doméstico. A Figura 25 apresenta a influência dos monômeros do ABS em suas propriedades. O ABS foi o primeiro material utilizado extensivamente pelas impressoras RepRap (ALBUQUERQUE, 2014).

Os filamentos de ABS são flexíveis e resistentes, ideais para a fabricação de componentes mecânicos. As peças fabricadas podem ser facilmente lixadas, coladas, e pintadas. No entanto, o aquecimento do filamento de ABS libera monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, que são prejudiciais à saúde. A temperatura de extrusão média para impressão 3D se encontra em torno de 225 °C. O ABS apresenta uma tendência de empenamento, sendo assim uma solução para minimizar o efeito é utilizar a base aquecida a uma temperatura máxima de 120 °C (SALINAS, 2014).

Figura 25 – Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.



Fonte: SIMIELLI e SANTOS (2010).

2.3.2.2 Poli Ácido Lático (PLA)

O PLA consiste em um biopolímero pertencente à família dos poliésteres alifáticos, do tipo poli(α - hidróxi-ácido), produzido a partir da síntese química do ácido lático obtido de fontes renováveis como milho, trigo, arroz entre outros. Caracteriza-se também por ser um termoplástico, semicristalino ou amorfo, biocompatível e biodegradável, não tóxico e com boa processabilidade térmica (LIM *et al.*, 2008; SANTOS, 2011; BRITO *et al.*, 2012; KAEZMAREK e KWIATKOWSKA, 2012).

As características citadas anteriormente aliadas às boas propriedades mecânicas e a capacidade de ser altamente hidrolisável no corpo humano, fazem do PLA um importante material em aplicações biomédicas (SATO, 2011). Na medicina costuma ser aplicado em produtos de fixação ortopédicas (pinos, hastes, ligamentos, etc.), aplicações cardiovasculares e intestinais, odontológicas e suturas. Além de também estar presente na indústria alimentícia em embalagens de cereais, doces, produtos lácteos entre outros (MUTHUI *et al.*, 2014).

Com relação a suas propriedades mecânicas, exibe um comportamento semelhante ao politereftalato de etileno (PET) e ao polietileno (PE) (BIJARIMI *et al.*, 2012; SOARES 2012). No entanto o PLA possui elevada fragilidade, com menos de 10% de alongamento

na ruptura, o que limita em alguns casos a sua aplicação (BRITO *et al.*, 2012; RASAL *et al.*, 2010).

O poli(ácido-lático) como homopolímero apresenta suas temperaturas de transição vítrea e de fusão em torno de 55 °C e 175 °C respectivamente (GARLLOTA, 2001). Ainda com relação ao material, pode-se destacar capacidade do PLA em ser moldado pelos principais processos industriais como uma de suas grandes vantagens. Entre os métodos os quais o poli(ácido-lático) é processado pode-se citar, por exemplo: injeção, moldagem por extrusão e sopro, moldagem por extrusão, termoformagem entre outros (HAGEN, 2009).

Os filamentos de PLA para impressão 3D são comercializados em grande variedade de cores, e são muito populares entre os entusiastas de impressão 3D, uma vez que o material é mais fácil de imprimir do que o ABS (BARNATT, 2014). O material geralmente é processado em temperaturas de extrusão entre (160 a 220) °C (HAMOD, 2014). A temperatura da base aquecida recomendada para a impressão com PLA é de 70 °C (MATTERHACKERS, 2013; ALBUQUERQUE, 2014).

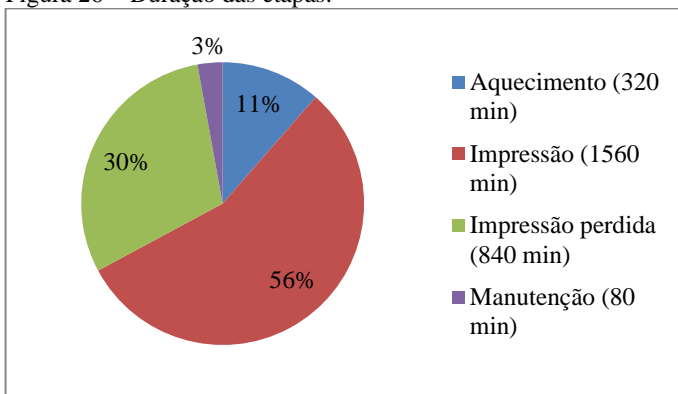
2.3.3 Avaliação de desempenho de equipamentos de código aberto

Azevedo (2013) realizou a montagem de uma impressora 3D RepRap Mendel, e, a partir do equipamento, elaborou uma avaliação de desempenho. Inicialmente as principais dificuldades encontradas pelo autor foram:

- a) dificuldade de calibrar a distância entre bico e plataforma de construção (base): segundo o autor, a altura do bico em relação à base deve ser em torno de 0,2 mm. Caso a calibragem não seja realizada de forma precisa, problemas como colisão entre o bico e a base, e de adesão das peças construídas à base, podem acontecer;
- b) ajuste da temperatura do bico e da base aquecida: devido às divergências entre os valores ideais, sugeridos pelos desenvolvedores do equipamento;
- c) baixa robustez: o equipamento foi sujeito a manutenções constantes, relacionadas ao afrouxamento de porcas e correias, calibragem da base, limpeza do bico, entre outros.

Para avaliar o desempenho do equipamento, Azevedo (2013) determinou três critérios: confiabilidade, qualidade e velocidade de impressão. O autor fabricou 20 peças iguais, e durante a construção das mesmas, mediu o tempo necessário para a impressão, manutenção e outros, representados no gráfico da Figura 26.

Figura 26 – Duração das etapas.



Fonte: Adaptado de AZEVEDO (2013).

De acordo com o autor, a falta de robustez do equipamento ocasionou a perda de 7 a cada 20 peças, em função do descolamento das peças da base, entupimento do bico, e problemas eletromecânicos. Falhas no bico, segundo Azevedo (2013), foram responsáveis por, pelo menos, metade dos problemas de impressão. As falhas foram observadas principalmente 30 minutos após o bico atingir a temperatura de operação, relacionado ao fato de que o filamento de plástico estava dilatando no tubo guia no interior do bico, devido ao aumento do calor no bico extrusor. O autor cita ainda problemas relacionados ao desgaste do filamento, devido ao fato do mesmo ser danificado pelas engrenagens de extrusão, que patinavam sobre o filamento.

Calvente (2013) montou uma impressora Prusa *Iteration 2* (Prusa I2), e identificou os erros associados ao equipamento para reprojetá-lo a fim de reduzir os problemas encontrados. Em um primeiro momento o autor avaliou a máquina individualmente em dois módulos: eletrônico e *software*; e mecânico.

A avaliação do módulo eletrônico e de *software* teve como objetivo testar os motores, resistências, sensores, placas de circuito, e a integração entre *softwares* de controle e interface. Os resultados mostraram que a eletrônica apresentou funcionamento correto.

Na análise do módulo mecânico foram testados: movimentações dos eixos X, Y e Z, capacidade do extrusor em alimentar 2 Kg de filamento (sem a presença do bico aquecido), e por fim, aquecimento do bico até 220°C para verificar se o sistema é capaz de extrudar 5 mm de filamento introduzido manualmente. O Quadro 3 apresenta os resultados dos testes.

Quadro 3 – Resultados da avaliação do módulo mecânico.

Teste	Resultado
Eixo X	Regular
Eixo Y	Regular
Eixo Z	Satisfatório
Extrusor	Satisfatório
Bico aquecido	Satisfatório

Fonte: Adaptado de Calvente (2013).

De acordo com o autor o equipamento realiza bem os movimentos nos três eixos, no entanto em X e Y foi observado incremento nas distâncias percorridas. Segundo Calvente (2013), o erro apresentado nos eixos ocorre devido ao sistema de movimentação utilizado apresentar excentricidade entre as polias e irregularidade na condução das correias.

Após análise individual dos módulos, Calvente (2013) avaliou o sistema com base na integração das partes. O protocolo de teste realizado pelo autor foi resumido nas seguintes etapas:

- a) aquecer o bico a uma temperatura de 220 °C;
- b) aquecer a base em 70 °C;
- c) executar o comando de extrusão, disponível no *software* de interface (*Pronterface*), com uma velocidade de 20 mm/min e alimentando 5 mm de filamento ao sistema;
- d) fabricar uma peça com dimensões de (20 x 20 x 10) mm;
- e) avaliar a peça sobre os seguintes aspectos: acabamento das superfícies (verificar se a impressão foi constante ao longo de toda a peça), e geometria da peça (medir os três eixos);
- f) classificar os resultados de cada teste em: satisfatório (os resultados são aceitáveis), regular (os resultados apresentam erros), e falho (não foi possível finalizar os testes, ou os resultados foram distantes do esperado).

As respostas obtidas nos testes realizados são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Avaliação da impressora 3D Prusa I2.

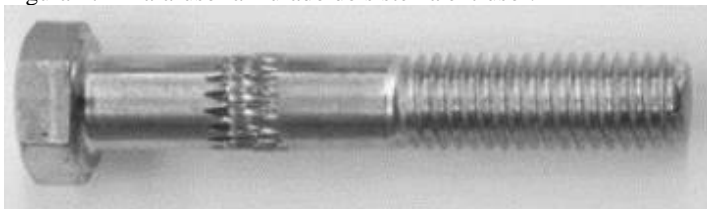
Teste	Resultado
Aquecimento do bico	Satisfatório
Aquecimento da base	Satisfatório
Extrusão	Regular
Fabricação	Falho
Acabamento das superfícies	-
Geometria	-

Fonte: Adaptado de Calvente (2013).

As conclusões obtidas por Calvente (2013) indicam que tanto o extrusor como o bico aquecido apresentam um bom funcionamento individualmente e falham quando integrados. O autor afirma que não foi possível obter uma extrusão contínua, mesmo com repetições exaustivas dos ensaios. As causas relatadas com responsáveis pelas falhas na extrusão são:

- a) força exercida sobre o filamento não é adequada;
- b) temperatura não adequada no bico aquecido;
- c) sistema responsável por empurrar o filamento é inadequado (o parafuso ranhurado, Figura 27, é saturado por material residual, e torna-se incapaz de realizar sua função);
- d) obstrução do bico;
- e) a temperatura do bico aquecido não permanece constante ao longo do tempo.

Figura 27 – Parafuso ranhurado do sistema extrusor.

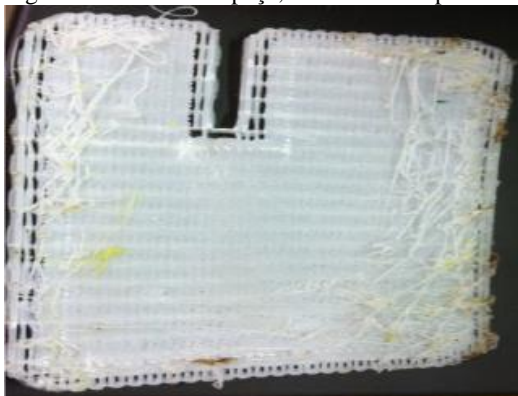


Fonte: Adaptado de Calvente (2013).

Zeyu (2014) avaliou uma impressora 3D *desktop* comercial, modelo UP!Plus produzida pela 3D Systems. De acordo com o autor, o equipamento apresentou os seguintes problemas: (i) falhas na alimentação de material durante a construção de uma peça; (ii) defeitos na plataforma de construção; (iii) o bico extrusor não depositou material

normalmente, devido à entupimento; (iv) os materiais foram queimados quando extrudados pelo bico. Os efeitos desses problemas resultaram em falhas nas peças, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Falhas na peça, resultantes de problemas no equipamento.



Fonte: Adaptado de ZEYU (2014).

Segundo Zeyu (2014) falha na alimentação de material é um problema comum em equipamentos desse tipo e estão relacionadas ao acúmulo de material residual dos filamentos sobre a polia ranhurada acoplada ao motor de passo do cabeçote extrusor, Figura 29. Os resíduos atuam como lubrificante entre a polia e o filamento, reduzindo a força de atrito entre as partes e, assim, dificultando o fornecimento de material ao sistema.

Figura 29 – Polia ranhurada do sistema de alimentação de material.



Fonte: Adaptado de ZEYU (2014).

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para atender o objetivo principal do presente trabalho, durante a etapa de revisão da literatura foram avaliados três estudos de caso realizados por Azevedo (2013), Calvente (2013), e Zeyu (2014), que analisaram o desempenho de equipamentos de impressão 3D baseados em projetos de código aberto. Independentemente das particularidades apresentadas pelos equipamentos avaliados, os autores relataram problemas associados ao funcionamento do cabeçote extrusor, os quais geraram impacto sobre a qualidade do fornecimento de material ao sistema e do processo de fabricação das peças.

Os problemas encontrados no cabeçote extrusor, segundo os autores, caracterizaram-se pelo entupimento do bico e pelo desgaste do filamento gerado pelo sistema responsável por empurrá-lo ao longo do bico aquecido (polia ou parafuso ranhurado). O material removido do filamento causa a saturação das ranhuras da polia ou parafuso, o que faz com que o filamento passe a escorregar sobre o elemento ranhurado.

O escorregamento do filamento em um processo de manufatura aditiva por extrusão, de acordo com Agarwala *et al.* (1996), Weeren *et al.* (1995), e Huang (2014), altera o fluxo de material depositado. Segundo Agarwala *et al.* (1996) e Langford (2012) um fluxo preciso de material no cabeçote extrusor é um importante fator para a determinação da qualidade das peças, uma vez que é responsável por controlar a largura dos filamentos depositados (AHN *et al.*, 2002). Assumindo essa relação, entende-se que o fluxo de material determina a resolução que pode ser alcançada pelo processo e a área de contato entre filamentos adjacentes, conforme citado por Turner *et al.* (2014). Por fim, a qualidade da união entre filamentos, de acordo com Bellehumeur *et al.* (2004), tem impacto direto nas propriedades mecânicas das peças fabricadas.

Este trabalho foi motivado pela constatação de que o escorregamento do filamento é um problema recorrente em máquinas baseadas em código aberto. Baseando-se nos conceitos gerais sobre a importância da precisão do fluxo de material nos processos de manufatura aditiva por extrusão, mas diante da limitação dos estudos sobre análise de desempenho das máquinas, que não mensuraram os efeitos do escorregamento sobre a quantidade de material a ser depositada e não os inter-relacionaram a critérios específicos de qualidade das peças fabricadas de forma a descrever o desempenho de repetibilidade do equipamento, buscou-se, aqui, explorar esses aspectos.

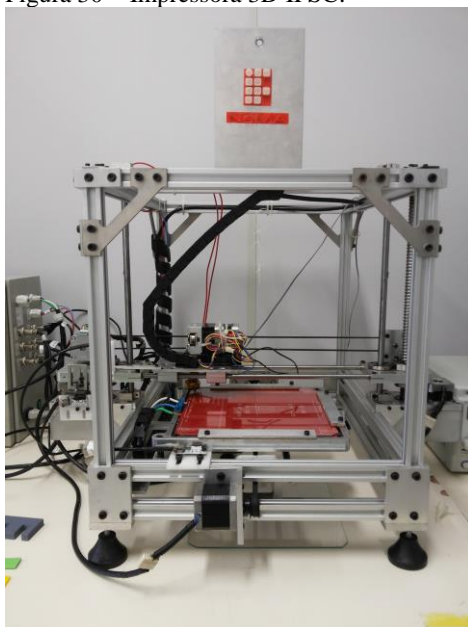
Entende-se que é importante reconhecer as limitações da máquina a partir das peças fabricadas, para que os efeitos de *hardware* sejam reduzidos e os estudos de processo possam ser realizados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado para a fabricação das amostras, Figura 30, foi desenvolvido em um projeto de pesquisa realizado no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), entre os anos de 2012 e 2013, e teve como referências plataformas de código aberto, dentre elas o modelo de máquina RepRap MendelMax. A diferença do equipamento utilizado para as demais máquinas RepRap está na parte mecânica, pois toda a estrutura foi feita em alumínio, para garantir maior rigidez, e no eixo Z, que dá incremento na espessura da camada, onde foi utilizado um sistema de transmissão de movimento baseado em fusos de esfera, que garante melhor precisão. O equipamento apresenta uma resolução de 0,03 mm para os eixos X e Y, e 0,02 mm para o eixo Z.

Figura 30 – Impressora 3D IFSC.



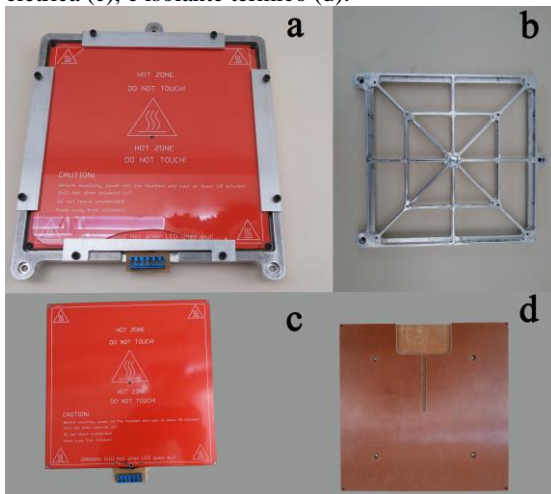
Fonte: Autoria própria⁵.

⁵ As fontes não citadas em Figuras, Tabelas, e Quadros são de autoria própria do mestrando.

O equipamento apresenta uma cinemática, onde o cabeçote extrusor realiza uma movimentação ao longo dos eixos X e Z, e a plataforma de construção em Y.

A plataforma de construção, Figura 31, é uma importante parte do equipamento, uma vez que por dispor de um elemento aquecido, auxilia no processo de fixação das peças enquanto são construídas. Basicamente este conjunto é formado por: uma estrutura de alumínio, um elemento isolante térmico, uma resistência elétrica, e uma placa de vidro, sobre a qual o material é depositado.

Figura 31 – Plataforma de construção (a), estrutura de alumínio (b), resistência elétrica (c), e isolante térmico (d).



O cabeçote extrusor é outra importante parte do equipamento. O sistema é constituído por um módulo tracionador e por um bico aquecido com extremidade calibrada. O módulo de tracionamento consiste em um dispositivo comercial, modelo *Bulldog XL* (Figura 32). O sistema é responsável por puxar o filamento que está enrolado em uma bobina, ou carretel, e empurrá-lo ao longo do bico aquecido.

O módulo de tracionamento utilizado no equipamento caracteriza-se por um sistema onde as partes responsáveis por acionar a movimentação do filamento não processado, encontram-se acopladas ao eixo do motor. Tal módulo é composto por um motor de passo padrão nema17, um redutor planetário de 5:1 — com função de fornecer torque para o sistema — e um elemento ranhurado (ou polia ranhurada), que

auxilia na ação de empurrar o material de alimentação, Figura 32. O redutor e a polia ranhurada são acoplados em série com o eixo do motor. Um sistema móvel composto por dois parafusos, duas molas e um rolamento atuam no controle da pressão no tracionador, empurrando o filamento no sentido da polia ranhurada e auxiliando na condução do material para o bico aquecido, Figura 33.

Figura 32 – Módulo de tracionamento do filamento, *Bulldog XL*.

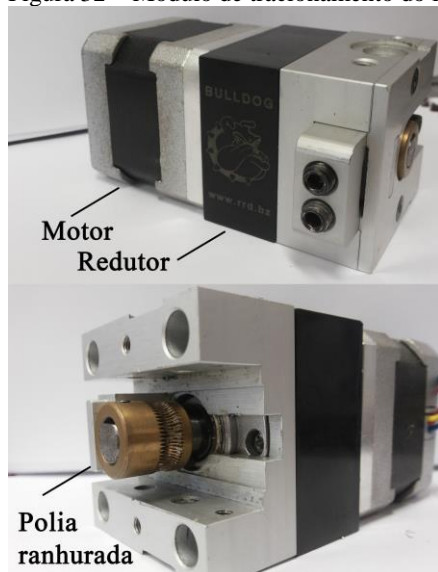
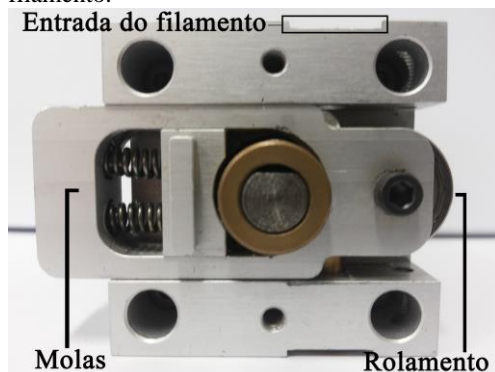
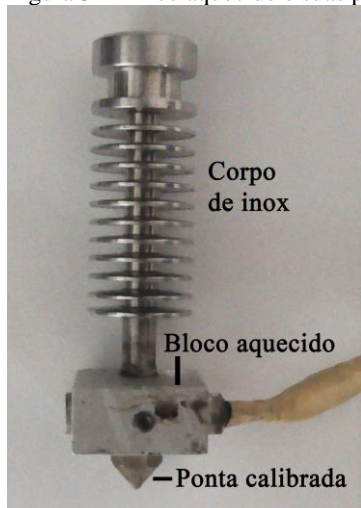


Figura 33 – Vista frontal do *Bulldog XL*, sistema de ajuste da pressão sobre o filamento.



A segunda parte do cabeçote extrusor, conforme citado anteriormente, consiste no bico aquecido. O bico aquecido, Figura 34, é um componente formado por quatro partes: corpo de inox, tubo de teflon (parte interna do corpo de inox), bloco aquecido e a ponta calibrada.

Figura 34 – Bico aquecido e suas principais partes.



A parte eletrônica e de *software* (de controle e de interface) do equipamento permaneceram fieis ao modelo original. Toda a programação da máquina é baseada em um *firmware*, responsável por comandar as ações do equipamento com base na interpretação de sinais e do código G, desenvolvido para atuar em plataformas microcontroladas do tipo Arduino.

A ação de controle realizada pelo Arduino é feita em conjunto com uma placa controladora, acoplada ao mesmo, que dispõe dos circuitos responsáveis por acionar os motores de passo (*drivers*), controlar a temperatura da plataforma de construção e do cabeçote extrusor, recepcionar os sinais dos interruptores de fim de curso e sensores de temperatura, entre outros. Uma relação geral das características de *hardware* e *software* utilizados no equipamento é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 – Relação dos *softwares* e *hardwares* utilizados no equipamento.

<i>Software /Hardware</i>	Descrição
<i>Software host</i> (interface)	<i>Pronterface</i>
<i>Firmware</i>	<i>Sprinter</i>
Arduino	Mega 2560
Controladora	<i>Ramps 1.4</i>
<i>Driver</i> motor de passo	<i>Pololu A988</i>
Base aquecida	<i>PCB Heatbed MK2</i>
Módulo tracionador (cabeçote extrusor)	<i>Bulldog XL</i>
Bico aquecido (cabeçote extrusor)	<i>Hotend Inóx Sethi3D</i>
Sensores de temperatura	Termistor 100K

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

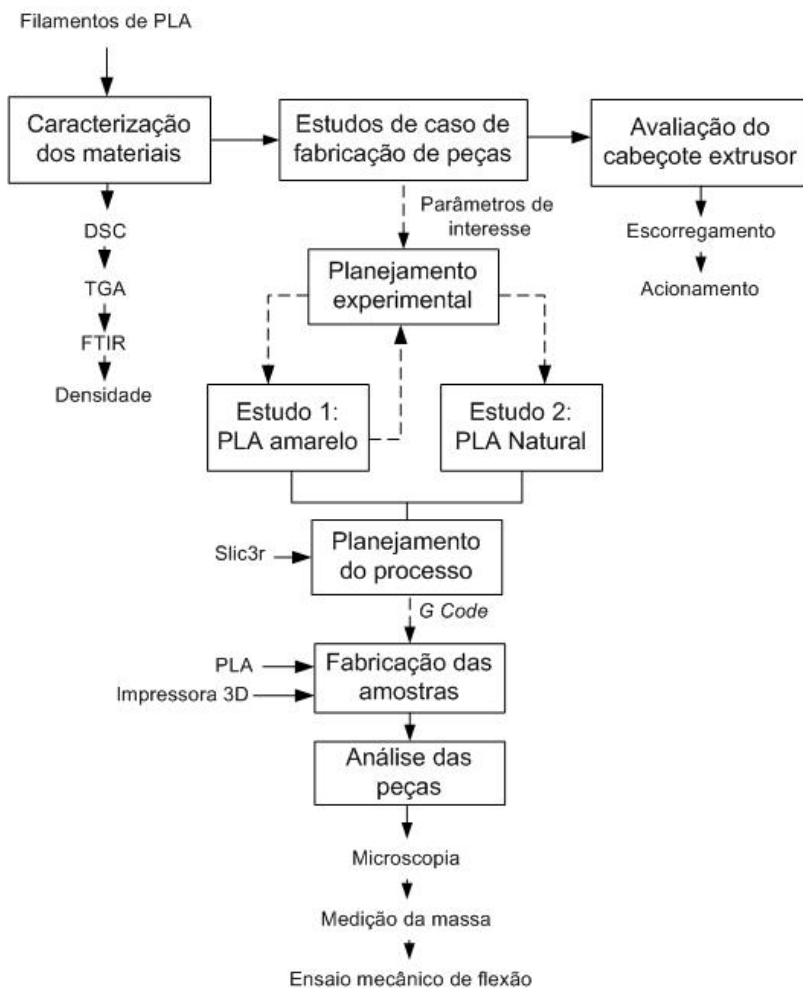
A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho de um equipamento de impressão 3D de código aberto na fabricação de peças em PLA, buscando enfatizar as principais dificuldades encontradas na execução da tarefa.

Visando atender os objetivos propostos, o trabalho foi dividido em três momentos. No primeiro foi realizado um estudo de reconhecimento das características dos PLAs disponíveis para a realização da pesquisa. Na segunda etapa, foram analisadas peças fabricadas em dois estudos de caso, onde foram variados parâmetros de processo e os filamentos de PLA.

Os estudos buscaram avaliar a influência de parâmetros de processo sobre a qualidade das peças, e fornecer informações quanto à capacidade do equipamento em fabricar componentes. O aspecto qualitativo selecionado para a análise das peças foi à integridade da união entre os filamentos depositados.

Por último, foi analisado o desempenho e a confiabilidade do cabeçote extrusor, buscando indicar fatores de influência sobre a eficiência do processo de fornecimento de material no sistema. De maneira geral, o fluxo com que a pesquisa se desenvolveu é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Diagrama de etapas da pesquisa.



Os procedimentos de análise, como mostrado na Figura 35, foram divididos em três grupos, que avaliaram respectivamente os materiais, as peças fabricadas, e o cabeçote extrusor.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A primeira etapa do trabalho, Figura 35, foi destinada ao reconhecimento das principais propriedades dos tipos de PLA disponíveis para a realização da pesquisa. Os filamentos utilizados no estudo foram adquiridos da empresa Sethi3D. O objetivo foi verificar se existiam diferenças significativas entre os filamentos de PLA com diferentes colorações, e até mesmo entre materiais ditos como naturais. Os resultados obtidos neste estudo de caracterização dos materiais foram utilizados como parâmetro de entrada para os estudos de caso seguintes, uma vez que permitiram a seleção dos filamentos a serem utilizados na construção de peças.

Para caracterização dos materiais, no estudo de reconhecimento, foram realizados três experimentos: calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise termogravimétrica (TGA) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR); os dois primeiros para se obter as características térmicas dos materiais, e o terceiro para identificar os principais elementos da composição química.

Uma quarta análise dos materiais foi realizada, porém limitada aos filamentos de PLA selecionados para a confecção das amostras nos estudos de caso de fabricação de peças. O experimento realizado consistiu na medição da densidade dos materiais.

Foram analisados quatro filamentos de PLA, sendo dois pigmentados (Amarelo e Cinza), e dois naturais (Nat. A e Nat. B), conforme mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Filamentos de PLA analisados na pesquisa.



3.3.1 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

As amostras de filamento de PLA, foram submetidas à análise de DSC, para se obter as temperaturas de fusão (T_f) e transição vítrea (T_g). Para o experimento foi utilizado o equipamento STA 449 F1 Jupiter® (Netzsch), disponibilizado pelo laboratório LABMAT da Universidade Federal de Santa Catarina. O ensaio foi realizado com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, utilizando um cadinho de alumida.

3.3.2 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica foi realizada no mesmo equipamento utilizado para o DSC. O objetivo do ensaio foi obter a temperatura de degradação (T_d) dos materiais. As condições de ensaio foram: taxa de aquecimento de 10 °C/min, em um intervalo de (30 a 700) °C, em atmosfera de nitrogênio.

3.3.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os filamentos de PLA foram analisados em um espectrômetro de infravermelho Bruker, modelo TENSOR 27, pertencente ao LABMAT. Foram obtidos espectros em número de onda de (4000 a 600) cm^{-1} .

3.3.4 Medição da densidade

A medição da densidade dos filamentos de PLA utilizados para a confecção das amostras foi realizada com o objetivo de garantir confiabilidade no cálculo da massa de um sólido fabricado em Poli Ácido Láctico, para posterior comparação com as peças fabricadas para o estudo, configuradas no *software* de planejamento de processo com um preenchimento de 100 %.

Para a medição da densidade dos materiais foi utilizada uma balança METTIER TOLEDO XS205 *Dual Range I*, disponibilizada pelo laboratório LABMAT. O equipamento possui uma função automática para a medição da densidade, a partir de parâmetros de entrada, como o líquido no qual o material será submerso e a sua temperatura, massa do material antes da submersão e massa do material enquanto completamente submerso. Foram realizadas cinco medições de densidade para cada filamento de PLA e o líquido utilizado foi água destilada, em temperatura de 23,5 °C.

3.4 ESTUDOS DE CASO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS

A etapa de análise das peças foi dividida em dois estudos de caso. Para cada um dos estudos realizados, inicialmente foi definido um planejamento experimental com base nas variáveis de interesse. Como pode ser observado na Figura 35 (metodologia), além dos parâmetros de processo a serem avaliados, o segundo estudo de caso teve ainda como entradas as informações obtidas no estudo anterior.

Após a organização dos experimentos, a etapa seguinte consistiu no planejamento do processo de construção das amostras. Neste momento foram definidos os procedimentos de fabricação, configuração dos parâmetros de processo, e geração dos códigos de fabricação das peças.

Em cada um dos estudos as peças fabricadas foram submetidas a três avaliações. Primeiramente foram adquiridas imagens microscópicas das superfícies das peças imediatamente após a fabricação, para justificar possíveis resultados encontrados após os ensaios que pudessem alterar a integridade da peça. Em seguida foi medida a massa das amostras para se constatar se um corpo de prova ajustado com um preenchimento de 100 % teria massa próxima a de um modelo teórico (calculado considerando o volume da peça e a densidade do material de construção utilizado). Por fim, foi realizado um ensaio mecânico para se obter a resistência máxima à flexão, que indicasse a influência da qualidade da adesão ou da ligação entre os filamentos sobre a resposta analisada.

Como corpo de prova padrão para a presente pesquisa, utilizou-se a geometria proposta pela norma ASTM D790 (2010) para ensaios de flexão, que consistem em um retângulo padrão com as seguintes dimensões: (127 x 12,7 x 3,2) mm. Tais corpos de prova, além dos ensaios mecânicos, também foram submetidos as demais análises propostas no estudo de caso, ou seja, aquisição de imagens microscópicas e medição da massa. As amostras foram modeladas no *software* CAD *Solidworks*™.

3.4.1 Estudo caso de fabricação: PLA amarelo

Nesta etapa da pesquisa foi realizado um estudo de parâmetros de processo — definidos a partir da revisão bibliográfica e com base nas características do equipamento utilizado — buscando investigar influência dos mesmos sobre a qualidade da união entre os filamentos adjacentes que compõe a estrutura da peça final.

O estudo foi organizado segundo a metodologia de Taguchi, com o objetivo de avaliar mais parâmetros com um número reduzido de amostras. Foram avaliados três fatores (parâmetros de processo) — espessura de camada, velocidade de impressão e temperatura de extrusão — e três níveis para cada fator, conforme a Tabela 5.

Tabela 5- Parâmetros de processo avaliados e níveis atribuídos.

Parâmetros	Níveis		
Espessura de camada (mm)	0,25	0,30	0,35
Velocidade de impressão (mm/s)	20	40	60
Temperatura de extrusão (°C)	190	200	210

Com base no número de fatores e níveis, foi selecionado um arranjo ortogonal de Taguchi do tipo L9, Tabela 6, gerando um total de nove situações, combinações de parâmetros, com três repetições cada, o que resultou em um total de 27 amostras.

Tabela 6 – Organização dos experimentos, arranjo ortogonal L9.

Situações	Espessura de camada (mm)	Velocidade de impressão (mm/s)	Temperatura de extrusão (°C)	Código
1	0,25	20	190	E1V1T1
2	0,25	40	200	E1V2T2
3	0,25	60	210	E1V3T3
4	0,30	20	200	E2V1T2
5	0,30	40	210	E2V2T3
6	0,30	60	190	E2V3T1
7	0,35	20	210	E3V1T3
8	0,35	40	190	E3V2T1
9	0,35	60	200	E3V3T2

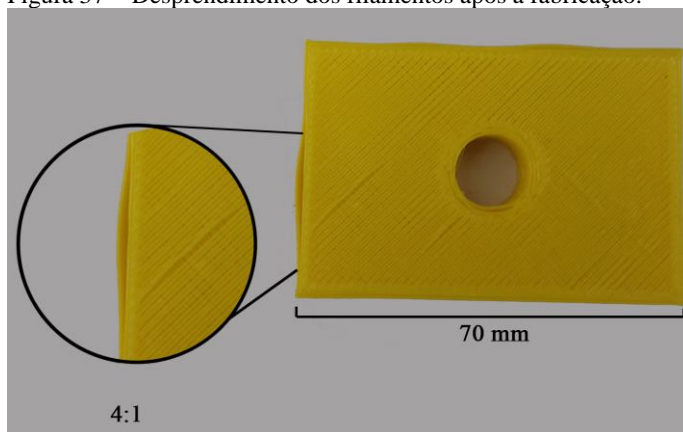
Cada uma das três amostras, com o mesmo conjunto de parâmetros, foi construída individualmente e em sequência. A individualidade permite que todas as amostras sejam posicionadas no mesmo ponto da base aquecida, para que sejam construídas sob as mesmas condições de temperatura. Tal estratégia de fabricação se baseia em estudos realizados por Silveira *et al.* (2014) no equipamento FDM

utilizado nesta pesquisa, que confirmaram não haver uniformidade de temperatura em todas as regiões da plataforma de construção.

Conforme pode ser observado na Tabela 6, foi criado um código para resumir a sequência de parâmetros utilizada em cada uma das situações descritas e o nível atribuído a cada um deles. O código é descrito da seguinte maneira: as letras representam o parâmetro de processo — espessura de camada (E), velocidade de impressão (V) e temperatura de extrusão (T) —, e os números os níveis utilizados.

Para a construção das amostras foi utilizado um filamento de PLA de 3 mm amarelo. Como será apresentado na seção 4.1, os filamentos de PLA disponíveis para a pesquisa apresentaram um comportamento térmico e químico muito semelhante, principalmente os materiais com pigmentos (amarelo e cinza). Sendo assim a escolha do PLA amarelo para a fabricação das amostras, foi principalmente devido ao fato de que peças fabricadas com este filamento, em etapas preliminares, apresentaram o efeito de desprendimento dos filamentos após a construção, conforme mostrado na Figura 37. Um dos objetivos do estudo foi reduzir este efeito, melhorando a adesão entre os filamentos depositados, através do ajuste dos parâmetros de processo selecionados.

Figura 37 – Desprendimento dos filamentos após a fabricação.



3.4.2 Estudo de caso de fabricação: PLA natural A

O segundo estudo de caso teve como principais entradas as respostas obtidas nas análises realizadas no estudo de fabricação de

peças com PLA amarelo. Estas repostas forneceram dados sobre a qualidade das peças obtidas, um panorama sobre os parâmetros processo avaliados, e também mostraram que o equipamento apresenta algumas limitações, relacionadas à capacidade de reproduzir peças fabricadas com a mesma configuração de parâmetros, com a mesma qualidade.

Neste sentido nesta segunda etapa de experimentos, buscou-se reduzir o número de variáveis, fixando a espessura de camada⁶, e avaliar mais especificamente dois parâmetros processo. Para organizar os experimentos, foi utilizado um planejamento fatorial baseado em dois fatores — velocidade de impressão e temperatura de extrusão — com três níveis associados a cada fator, com três repetições para cada condição, conforme mostra a Tabela 7. É importante mencionar que os níveis atribuídos aos parâmetros velocidade de impressão e temperatura de extrusão, foram mantidos iguais aos utilizados no primeiro estudo.

Tabela 7 – Tabela de experimentos.

Blocos	Código	Velocidade de impressão (mm/s)	Temperatura de Extrusão (°C)
1	V3T2	60	200
1	V2T1	40	190
1	V1T3	20	210
1	V2T2	40	200
1	V3T1	60	190
1	V2T3	40	210
1	V3T3	60	210
1	V1T1	20	190
1	V1T2	20	200
2	V3T2	60	200
2	V3T3	60	210
2	V1T1	20	190
2	V1T2	20	200
2	V3T1	60	190
2	V2T1	40	190

⁶ A espessura de camada foi fixada em 0,3 mm, pois as peças configuradas com este valor apresentaram os melhores resultados em relação aos critérios avaliados.

Tabela 7 - Tabela de experimentos (Continuação).

2	V1T3	20	210
2	V2T2	40	200
2	V2T3	40	210
3	V1T1	20	190
3	V1T2	20	200
3	V2T3	40	210
3	V1T3	20	210
3	V3T2	60	200
3	V3T3	60	210
3	V2T1	40	190
3	V3T1	60	190
3	V2T2	40	200

Diferentemente do estudo preliminar, no qual as amostras com os mesmos parâmetros de processo foram fabricadas individualmente e em sequência, nesta etapa, os corpos de prova foram construídos individualmente, mas de forma aleatória, seguindo a proposta da Tabela 7. Assim, tem-se uma forma de testar a capacidade do equipamento de reproduzir peças configuradas com o mesmo conjunto de parâmetros, mas construídas em momentos distintos.

Outro fator importante foi à utilização de um PLA natural (natural A) para a construção dos corpos prova. A justificativa para a mudança do material foi relacionada principalmente ao fato que algumas peças fabricadas no estudo com PLA amarelo apresentaram o efeito de delaminação das camadas após a realização do ensaio mecânico de flexão.

3.4.3 Procedimentos para a fabricação das amostras

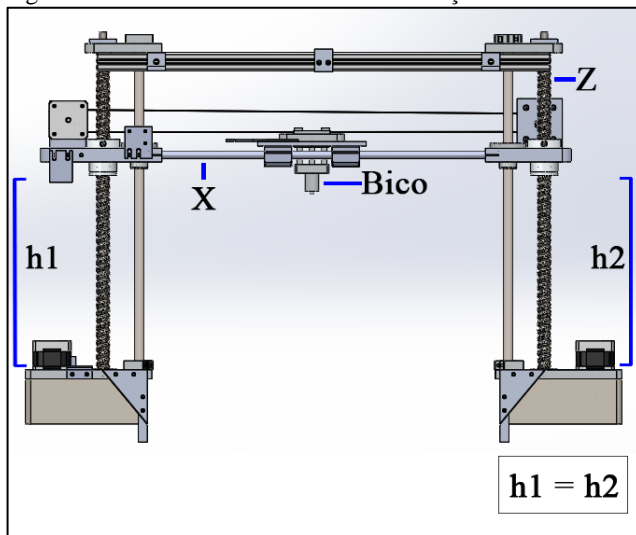
O procedimento básico de calibração do equipamento, adotado antes de iniciar uma jornada de fabricação de peças, e no intervalo de construção entre três amostras, consistiu nas seguintes etapas:

- a) verificar o alinhamento do eixo X em relação ao eixo Z: este procedimento é necessário, uma vez que o eixo Z é responsável por mover o eixo X verticalmente, através de dois eixos de movimentação paralelos, Figura 38. O movimento dos eixos é gerado por um par de motores de passo acionados

por um único *driver*. Para que a condição de inicial de trabalho fosse atendida, as extremidades do eixo X deveriam estar na mesma altura;

- b) verificar o nivelamento da plataforma de construção: primeiramente a base era aquecida até a temperatura que será utilizada para a construção das peças. A inspeção do nivelamento da plataforma de construção consistia em realizar trajetórias com o cabeçote extrusor percorrendo regiões centrais e extremidades da base, verificando a distância bico – plataforma, com o auxílio de uma chapa metálica calibrada com espessura de 0,1 mm. À distância padrão de 0,1 mm, foi sugerida no estudo de Bratl (2013);
- c) aquecer o bico até a temperatura de trabalho e realizar extrusão livre de material: o objetivo desta etapa era testar o funcionamento do motor responsável por acionar a alimentação de material ao sistema. Outros objetivos da etapa eram limpar possíveis resíduos de material presentes no bico, e avaliar visualmente o fluxo de material para identificar a necessidade de uma inspeção no canal do bico (corpo de inox) visando seu desentupimento ou a limpeza da polia ranhurada.

Figura 38 – Alinhamento do eixo X em relação ao eixo Z.



Durante a fabricação das amostras a temperatura e a umidade do ambiente onde a impressora 3D encontrava-se instalada foram mantidas em torno de 22°C e 45 %, respectivamente. Outro importante cuidado adotado foi em relação ao armazenamento dos filamentos de PLA. Para evitar que o material ficasse exposto à umidade e outras intemperes, ao final de cada etapa completa de construção de peças os rolos de filamento eram removidos do equipamento e armazenados. A solução adotada foi baseada na sugestão proposta por Bouthillier (2013) que consistiu em armazenar os filamentos em recipiente hermético com material desumidificante no interior.

Para o fatiamento do modelo CAD 3D dos corpos de prova, isto é, a configuração dos parâmetros de processos para a construção das peças e geração do *G-Code*, foi utilizado o *software* livre *Slic3r* 1.1.7.

Um dado importante sobre o presente trabalho está relacionado ao uso do termo geral “velocidade de impressão”, designado para descrever a velocidade com que o equipamento realiza as trajetórias ao longo da construção das peças. Esse esclarecimento se faz necessário, uma vez que o *Slic3r*, em sua opção de configuração de velocidade de impressão, permite aos usuários configurar diferentes valores de velocidade de acordo com regiões específicas das peças — perímetros, preenchimento, camadas do topo e base, entre outros — ou estruturas, como suporte.

Sendo assim para a aplicação do termo geral, todos os valores de velocidade, foram ajustados de acordo com os níveis apresentados na Tabela 5. A única exceção na etapa de configuração dos parâmetros de velocidade está relacionada à construção da primeira camada, onde foi utilizado um valor mais baixo de velocidade, com o objetivo de garantir a fixação do material depositado sobre a área de construção sem o uso de um adesivo externo. No entanto este valor de velocidade para primeira camada caracteriza-se por um valor percentual — uma opção fornecida pelo *software* — relativo a todas as velocidades ajustadas, e, portanto, proporcional aos níveis utilizados das demais camadas. Os níveis de velocidade de impressão utilizados na pesquisa foram selecionados com base nos valores mínimos e máximos da configuração *default* do *Slic3r*.

Com relação à espessura de camada e a temperatura de extrusão, o *Slic3r* permite que estas variáveis sejam ajustadas com um valor diferente para a primeira camada, em relação a todas as demais. No entanto, a temperatura de extrusão e a espessura de camada foram ajustadas com os mesmos valores, relacionados aos seus respectivos níveis, tanto na primeira como nas demais camadas da peça.

Ainda sobre a espessura da camada, os níveis foram selecionados com o objetivo de confrontar os valores de ajustes sugeridos pelo Guia e Calibração da RepRap (espessura de camada menor que 80% do diâmetro do bico) (REPRAP.ORG, 2014), e o menor valor *default* do Slic3r para as configurações de máquina realizadas no *setup* do programa.

Já os parâmetros de processo configuráveis mantidos fixos, em sua maioria foram utilizados os valores *default* do *software*, com exceção alguns que foram alterados, para colaborar com o objeto de estudo e o processo de fabricação. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros fixos.

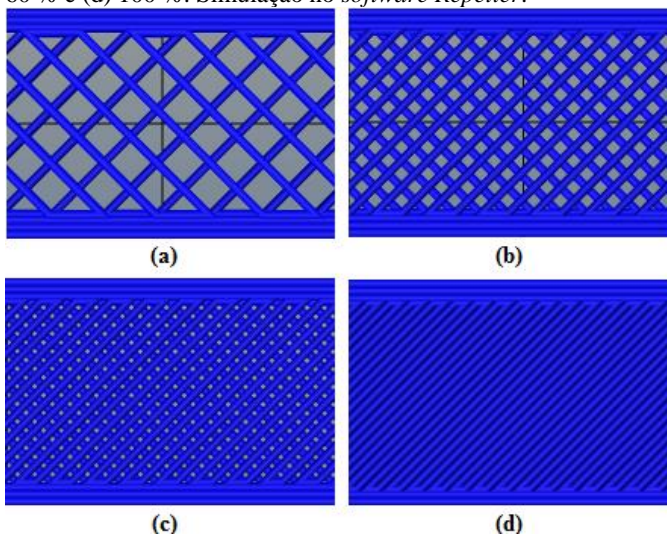
Parâmetros fixos	Valores
Preenchimento	100 %
Estratégia de preenchimento	Retilínea
Velocidade na primeira camada	15 %
Número de <i>loops</i>	4
Temperatura da base	70 °C
Diâmetro do bico	0,4 mm
Diâmetro do filamento	3,0 mm

Em relação à largura dos filamentos depositados (ou de varredura), — parâmetro *extrusion width* no Slic3r —, o *software* fornece ao usuário sete opções de configuração para diferentes regiões da peça. O ajuste da largura de extrusão, dentre as opções disponíveis, pode ser feito com um valor percentual relativo diretamente à espessura de camada, ou, permitindo que o *software* calcule automaticamente. Neste trabalho optou-se pelos valores automáticos. A Tabela 9 mostra os principais valores de largura de extrusão calculados pelo o Slic3r, os quais, no preenchimento, variaram com a espessura de camada, na transição de 0,25 mm para (0,30 e 0,35) mm.

Tabela 9 – Ajuste automático da largura do filamento pelo Slic3r.

Espessura de camada (mm)	Largura do filamento (mm)	
	Perímetro	Preenchimento
0,25	0,40	0,53
0,30	0,40	0,42
0,35	0,40	0,42

O parâmetro que regula a quantidade de material no preenchimento — chamado densidade de preenchimento (*fill density*) no *Slic3r* —, foi utilizado para ajustar a distância entre os filamentos depositados, Figura 39, buscando aproximá-los ao máximo. Essa configuração foi feita com o objetivo de favorecer o estudo da qualidade da união entre os filamentos vizinhos. O ajuste do preenchimento foi feito em 100 % (Figura 39, d).

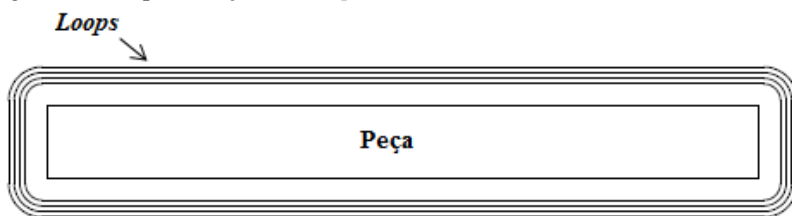
Figura 39 – Variação na quantidade de preenchimento: (a) 20 %, (b) 40 %, (c) 60 % e (d) 100 %. Simulação no *software Repetier*.

Outra variável citada na Tabela 8, denominada de número de *loops*, consiste basicamente em uma reprodução do contorno da peça, Figura 40, a qual é construída na primeira camada, a certa distância do componente. Por padrão o *software* encontra-se configurado para realizar apenas uma estrutura deste tipo, a 6 mm da peça. No presente

trabalho, diante de um fator observado durante a construção de peças, verificou-se que o sistema de deposição apresentava certo atraso para começar a depositar material assim que o programa (*GCode*) era iniciado. Tal fator refletia em defeitos por falha de deposição na construção da primeira camada, que ocorriam na execução do *loop* e se estendiam para a peça.

Diante dessa situação optou-se por utilizar um número maior de *loops*, mantendo *default* a distância em relação à peça, fazendo com o sistema de deposição superasse o *delay* existente na extrusão de material, antes de iniciar a construção da peça, além de proporcionar também a limpeza de material residual presente no bico. A escolha de um número de *loops* igual a quatro, foi um ponto de equilíbrio testado, que se baseou na geometria do corpo de prova, buscando eliminar o problema descrito, e não aumentar o tempo de fabricação.

Figura 40 - Representação dos *loops*.



A temperatura da base é outro parâmetro que, assim como a temperatura de extrusão e a espessura de camada, pode ser ajustado com diferentes valores para a primeira e para as demais camadas. Porém optou-se por manter a temperatura constante, ou seja, em um mesmo valor do início ao fim do processo de construção das amostras. O objetivo foi evitar que as peças se desprendessem da base durante o processo de fabricação, e que não fosse necessário o uso de um adesivo externo (cola), para garantir a fixação do componente. O valor foi ajustado em 70 °C, conforme apresentado na Tabela 8, seguindo as recomendações propostas por Matterhackers (2013), e Albuquerque (2014).

3.4.4 Microscopia

Cada um dos corpos de prova fabricados foi submetido à análise de imagens microscópicas. Foram avaliadas as superfícies do topo e base das peças, com objetivo de analisar a união entre os filamentos

adjacentes, a presença de vazios e a geometria dos filamentos depositados.

O equipamento utilizado nesta etapa de análise foi um estereomicroscópio Zeiss Stemi 200-C, localizado no laboratório de materiais do Instituto Federal de Santa Catarina.

3.4.5 Medição da massa

A medição da massa dos corpos de prova teve como intuito constatar a configuração de um parâmetro de processo específico, neste caso a quantidade de material no preenchimento. Para isso foi utilizada uma balança analítica SHIMADZU AUX 220 (Máx. 220 g, Mín. 10mg), com uma resolução de 0,0001 g, disponibilizada pelo laboratório de química do Instituto Federal de Santa Catarina.

3.4.6 Ensaio de flexão

Os corpos de prova fabricados nos estudos de caso foram submetidos a um ensaio mecânico de flexão em três pontos, com o intuito de se obter a resistência máxima a ruptura (módulo de ruptura). O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaios mecânicos, EMIC modelo EL10000. No ensaio foi utilizada uma célula de carga de 500 N e uma velocidade de teste de 15 mm/min. Os ensaios foram realizados em parceria com a empresa SCiTec.

3.5 AVALIAÇÃO DO CABEÇOTE EXTRUSOR

Nesta etapa da pesquisa foi avaliada a confiabilidade do cabeçote extrusor, uma vez que o conjunto corresponde à ferramenta responsável pela construção das peças, e, portanto, falhas no seu comportamento terão impacto sobre a qualidade da deposição de material, e na integridade das peças fabricadas. Neste estudo foi realizada a avaliação de desempenho somente do módulo de tracionamento, por ser responsável pela alimentação de material ao longo do processo de fabricação de peças.

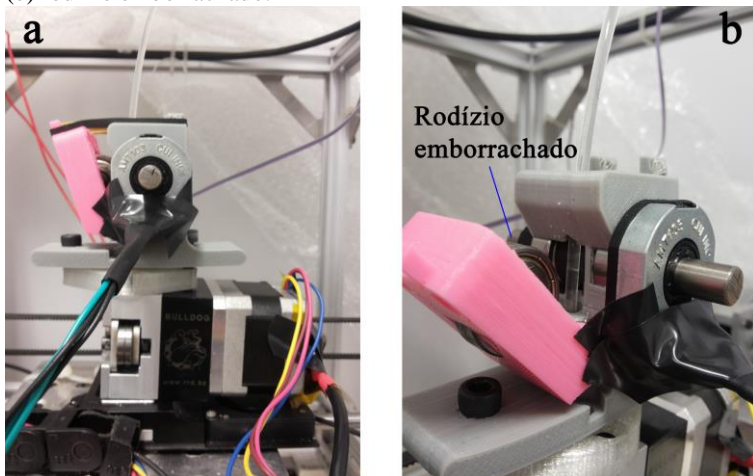
A análise foi baseada em um estudo de deposição livre, isto é, o cabeçote extrusor foi mantido estático, e através do *software* de interface do equipamento *Pronterface* foi comandado um valor referente ao comprimento de filamento para ser extrudado ao longo do bico aquecido, sem o propósito de construção de peça. O objetivo da análise foi verificar se havia disparidades entre o comprimento de material

ajustado via *software* para ser extrudado, e o valor real fornecido ao sistema de deposição.

Durante a extrusão do material, foi monitorado o deslocamento do filamento na entrada do cabeçote de extrusão, e o acionamento do motor do módulo de tracionamento. As características monitoradas foram selecionadas com o intuito de analisar, respectivamente, falhas na alimentação de material por escorregamento do filamento na polia ranhurada, e por perda de comando no motor — uma vez que é a parte do sistema que aciona o deslocamento do filamento.

Para a medição do escorregamento foi utilizado um sistema de análise constituído por um dispositivo mecânico de medição, e um módulo de aquisição baseado na plataforma Arduino, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em manufatura aditiva do IFSC. O dispositivo mecânico foi montado diretamente na entrada do cabeçote extrusor, Figura 41 (a). O sistema é formado por um rodízio emborrachado, Figura 41 (b), o qual gira em virtude do atrito com o filamento em movimento. Acoplado ao rodízio, um encoder gera pulsos proporcionais ao comprimento de filamento alimentado no cabeçote extrusor. Para garantir o contato entre o filamento e o eixo, foi utilizado um conjunto formado por um rolamento e um par de elásticos.

Figura 41 – Dispositivo mecânico de medição sobre o cabeçote extrusor (a), e (b) rodízio emborrachado.

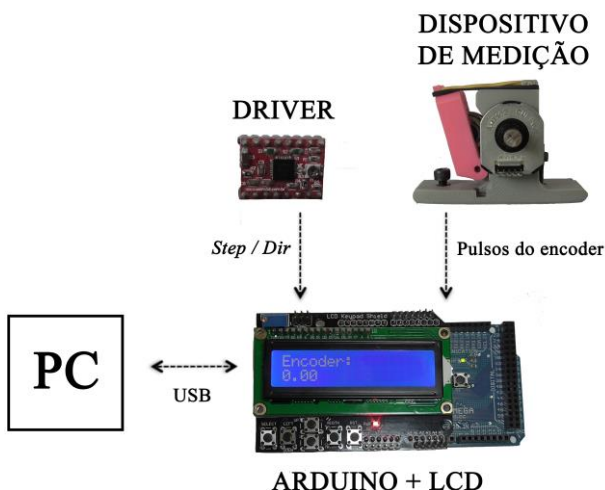


O sistema de aquisição recebe os sinais enviados pelo encoder, e também monitora o comando *step/dir* do driver responsável pelo

acionamento do motor de passo do módulo de tracionamento. O intuito dessa ação de monitoramento foi verificar a exatidão no comando enviado para o motor, quantidade de passos, e através da relação de passos por milímetros (*steps per mm*) determinar o comprimento de filamento alimentado⁷.

Os dados fornecidos pelo sistema de aquisição podem ser acessados através de uma interface LCD acoplada ao Arduino, e por um software de monitoramento de porta serial via PC — o qual permite salvar as informações fornecidas, para posterior análise. Em ambas as interfaces o valor fornecido em tempo real ao usuário consiste no comprimento em milímetros de filamento deslocado. O esquemático de aquisição e monitoramento é representado na Figura 42.

Figura 42 – Dinâmica de aquisição de dados.



A partir dos dados obtidos pelo sistema de aquisição, é possível identificar as possíveis causas de falha na alimentação de material, descritas da seguinte maneira:

- a) perda de comando (PDC): equivale à redução percentual calculada a partir do comprimento de filamento, comandado

⁷ O deslocamento do motor nem sempre equivale a um comprimento de filamento alimentado no sistema, uma vez que ocorre o escorregamento do material de alimentação no elemento ranhurado do módulo de tracionamento.

via software para a extrusão, e o deslocamento gerado pelo motor em milímetros (quantidade de passo);

- b) escorregamento real do filamento (ERF): corresponde à redução percentual entre o deslocamento do filamento medido pelo encoder e o deslocamento gerado pelo motor em milímetros;
- c) erro total no sistema (ETNS): é a redução percentual entre o comprimento do filamento comandado via software para a extrusão, e o comprimento de filamento deslocado, medido a partir do encoder.

Neste estudo foram variados os parâmetros de processo, velocidade de extrusão (V_e) e temperatura de extrusão (T), em três níveis, combinados conforme a Tabela 14. Para cada uma das condições de análise propostas na Tabela 10 foram realizadas sete repetições, todas com 100 mm de material para extrusão.

Tabela 10 – Condições de estudos em relação aos parâmetros de processo.

Condições	Código	Velocidade de Extrusão (mm/min)	Temperatura de Extrusão (°C)
1	V_e1T1	20	190
2	V_e1T2	20	200
3	V_e1T3	20	210
4	V_e2T1	40	190
5	V_e2T2	40	200
6	V_e2T3	40	210
7	V_e3T1	60	190
8	V_e3T2	60	200
9	V_e3T3	60	210

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na Figura 43 a seguir são apresentadas as curvas dos ensaios de DSC para os filamentos de PLA. As temperaturas de fusão (T_f) e transição vítrea obtidas no ensaio de calorimetria por varredura são apresentadas também na Tabela 11.

Figura 43 – Curvas DSC para os filamentos de PLA analisados.

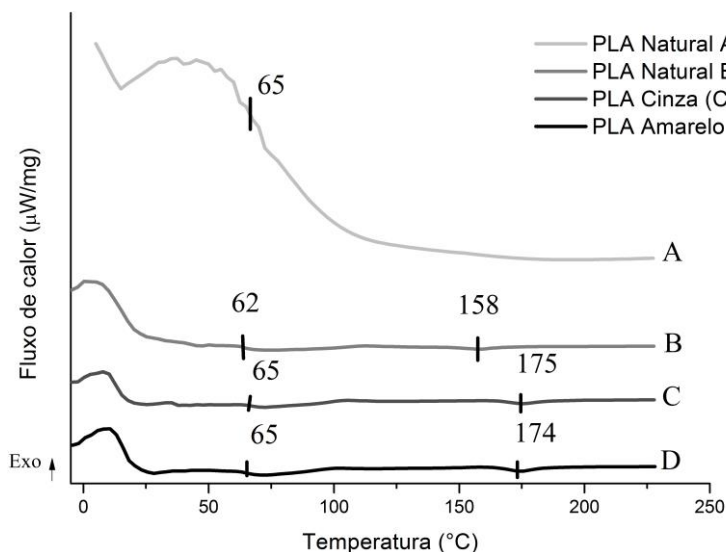


Tabela 11 – Temperatura de fusão e transição vítrea, ensaio de DSC.

PLA	T_f (°C)	T_g (°C)
Cinza	175	65
Amarelo	174	65
Natural A	-	65
Natural B	158	62

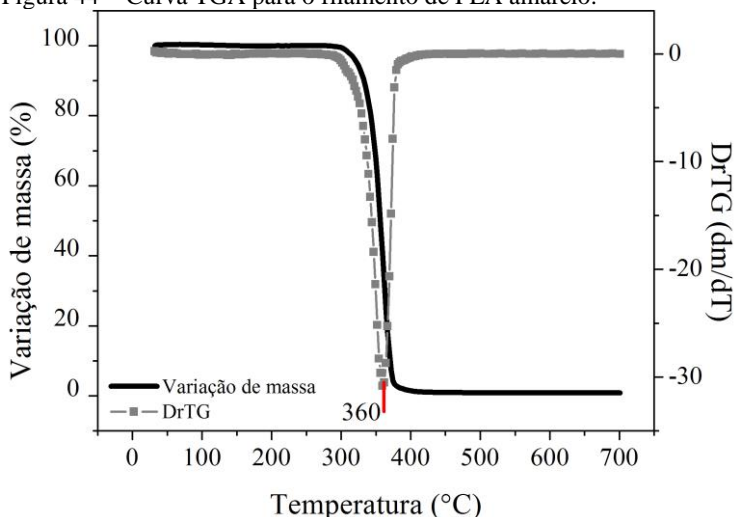
Os resultados obtidos na análise de DSC mostram que, em relação à temperatura de transição vítrea (T_g), os materiais apresentam comportamento semelhante. Dos quatro filamentos de PLA analisados, em três casos a T_g encontra-se em torno de 65 °C, a exceção foi PLA

natural B, o qual apresentou uma temperatura de transição vítrea em torno de 3 °C inferior aos demais.

As curvas do DSC permitiram identificar as temperaturas de fusão dos materiais amarelo, cinza, e natural B. Os filamentos de PLA coloridos apresentaram temperatura de fusão muito próxima, enquanto o material natural B apresentou ponto de fusão em torno de 17 °C abaixo dos pigmentados. No caso do PLA natural A, não foi possível identificar claramente a temperatura de fusão, esta característica apresentada sugere que o material avaliado apresenta uma estrutura molecular do tipo amorfa⁸.

No ensaio de TGA as curvas obtidas na análise apresentaram, de maneira geral, um perfil conforme mostrado na Figura 44. As curvas de TGA dos materiais cinza, natural A, e natural B, estão disponibilizadas no Apêndice A. As temperaturas de degradação obtidas na análise termogravimétrica são apresentadas na Tabela 12.

Figura 44 – Curva TGA para o filamento de PLA amarelo.



⁸ Polímeros amorfos não apresentam um ponto de fusão específico, o material se desloca de um estágio vítreo para um estado borrachoso até amolecer o suficiente para fluir quando uma força é aplicada (GILES *et al.*, 2005).

Tabela 12 – Temperaturas de degradação dos filamentos de PLA.

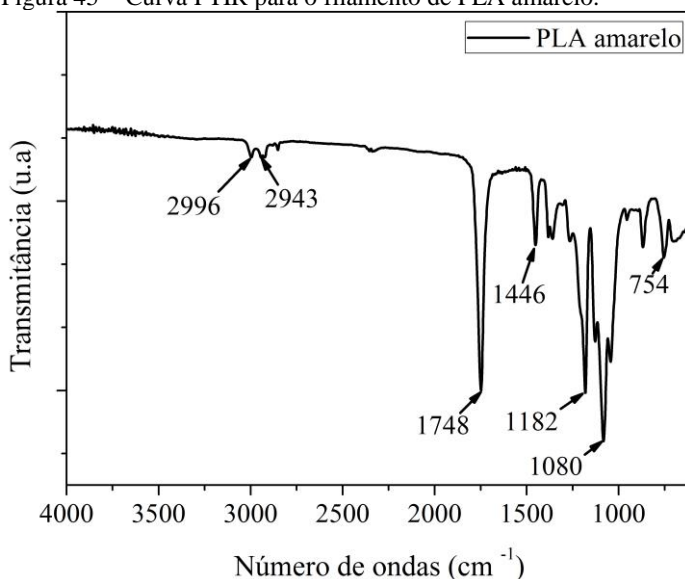
PLA	T _d (°C)
Cinza	360
Amarelo	360
Natural A	364
Natural B	362

Os materiais ditos naturais, A e B, degradam sob temperatura maior, de 2 a 4 graus acima dos filamentos pigmentados, que por sua vez apresentam temperatura de degradação semelhante entre si (360 °C).

Após a apresentação dos resultados obtidos nas análises térmicas dos materiais, faz-se a caracterização dos filamentos a partir de dados obtidos no ensaio de espectroscopia por infravermelho, que mostram os principais componentes da estrutura química dos filamentos de PLA analisados. Os materiais avaliados, pigmentados ou naturais, não apresentam diferenças significativas quanto a sua estrutura química.

As curvas obtidas demonstraram um comportamento semelhante, e são descritas de acordo com a Figura 45. Os demais gráficos de FTIR também se encontram acessíveis no Apêndice A.

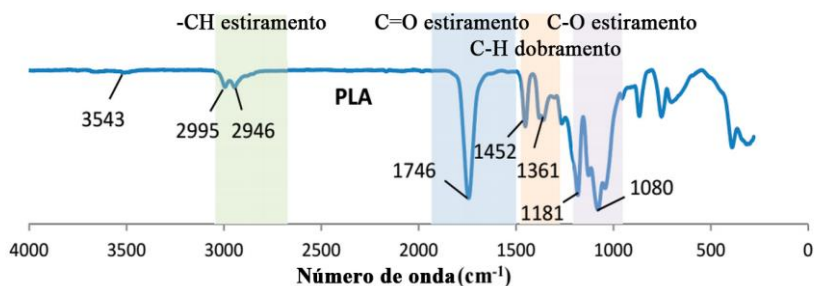
Figura 45 – Curva FTIR para o filamento de PLA amarelo.



Para auxiliar a interpretação dos dados fornecidos pelo ensaio de espectroscopia por infravermelho, foram utilizados como referência os estudos de Chieng *et al.*(2014) e Bitencourt (2011).

De acordo com Chieng *et al.* (2014) os espectros encontrados entre $(3000 \text{ e } 2850) \text{ cm}^{-1}$ correspondem ao estiramento $-\text{CH}$; as bandas entre $(1750 \text{ e } 1745) \text{ cm}^{-1}$ estão relacionadas ao estiramento $\text{C}=\text{O}$; o valores entre $(1500 \text{ e } 1400) \text{ cm}^{-1}$ equivalem ao dobramento $\text{C}-\text{H}$; o estiramento $-\text{C}-\text{O}$ ocorre entre $(1100 \text{ e } 1000) \text{ cm}^{-1}$; e as bandas situadas no intervalo de $(1080 \text{ e } 1085) \text{ cm}^{-1}$ caracterizam-se pelo estiramento $\text{C}-\text{O}$. Para efeitos comparativos com os resultados obtidos no presente estudo, a Figura 46 ilustra a curva FTIR apresentada por Chieng *et al.* (2014).

Figura 46 – Curva FTIR para o PLA, obtida no estudo de Chieng *et al.* (2014).



Fonte: Adaptado de CHIENG *et al.*(2014).

Por fim, segundo Bitencourt (2011), a banda em 1181 cm^{-1} é relativa ao estiramento simétrico $\text{C}-\text{O}-\text{O}$, e o espectros entre $(800 \text{ e } 754) \text{ cm}^{-1}$ ao estiramento $\text{C}-\text{H}$.

4.2 MEDIÇÃO DA DENSIDADE

Os resultados obtidos na medição da densidade das cinco amostras de filamento de PLA analisadas, amarelo e natural A, encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 – Medição da densidade do PLA amarelo, e natural A.

Amostras	Densidade (g/cm ³)	
	PLA amarelo	PLA natural A
1	1,229	1,230
2	1,220	1,236
3	1,225	1,236
4	1,226	1,237
5	1,228	1,238
\bar{X} (g/cm ³)	1,226	1,235
σ (g/cm ³)	0,004	0,003

A densidade dos materiais obtida no ensaio indica que os PLAs analisados apresentam valores de densidade próximos entre si, e em torno dos valores disponíveis da literatura — aproximadamente 1,25 g/cm³, segundo Henton *et al.* (2005),

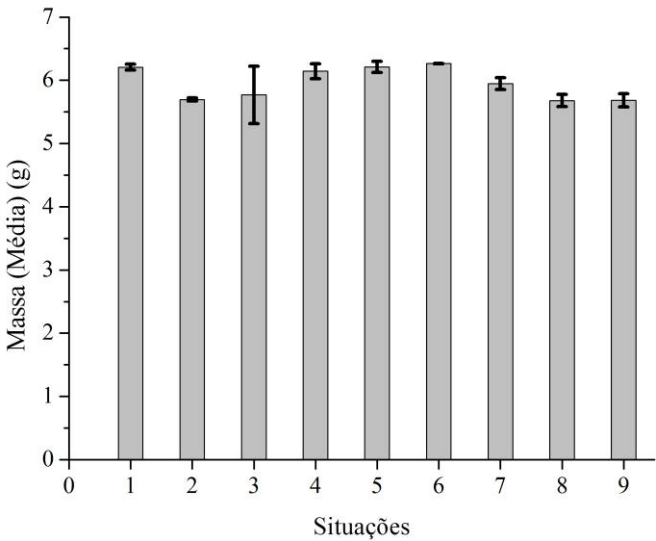
4.3 ESTUDO DE CASO DE FABRICAÇÃO: PLA AMARELO

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos na medição da massa das amostras para as situações avaliadas. O valor médio das massas de todas as amostras obtidas por situação, e seus respectivos desvios padrão são representados também na Figura 47.

Tabela 14 – Resultado da medição da massa das amostras.

Situações	Código	Massa (g)						
		CP1	CP2	CP3	\bar{X}	Σ	M	m
1	E1V1T1	6,16	6,25	6,22	6,21	0,05	6,25	6,16
2	E1V2T2	5,71	5,67	5,71	5,70	0,02	5,71	5,67
3	E1V3T3	6,28	5,61	5,42	5,77	0,45	6,28	5,42
4	E2V1T2	6,23	6,19	6,01	6,15	0,12	6,23	6,01
5	E2V2T3	6,16	6,16	6,31	6,21	0,09	6,31	6,16
6	E2V3T1	6,26	6,27	6,26	6,26	0,00	6,27	6,26
7	E3V1T3	5,91	5,88	6,05	5,95	0,09	6,05	5,88
8	E3V2T1	5,79	5,66	5,60	5,68	0,10	5,79	5,60
9	E3V3T2	5,81	5,63	5,62	5,68	0,11	5,81	5,62

Figura 47 – Representação da massa média obtida em cada situação.



Seguindo com a apresentação dos dados obtidos na medição da massa das amostras, a Tabela 15 exhibe a investigação proposta na seção 3.4, com o objetivo de confrontar os valores de massa medidos (média da massa dos três corpos de prova por situação) e um valor teórico de massa, calculado a partir do volume das peças e a densidade do material.

Tabela 15 – Comparação entre a massa medida e a massa calculada.

Situações	Código	Média das massas (g)	Massa calculada (g)	Desvio (%)
1	E1V1T1	6,21	6,43	-3,39
2	E1V2T2	5,70	6,43	-11,36
3	E1V3T3	5,77	6,43	-10,21
4	E2V1T2	6,15	6,53	-5,82
5	E2V2T3	6,21	6,53	-4,82
6	E2V3T1	6,26	6,53	-4,00
7	E3V1T3	5,95	6,23	-4,52
8	E3V2T1	5,68	6,23	-8,80
9	E3V3T2	5,68	6,23	-8,74

Na Tabela 15 se observa que os valores de massa calculados sofreram variações a cada três situações avaliadas. A diferença está relacionada às variações na espessura de camada que, associadas ao fato de se ter utilizado um fatiamento uniforme dos modelos, alterou a dimensão Z (altura) e, portanto, o volume das peças.

Os resultados apresentados na Tabela 15 mostram que, apesar de um preenchimento de 100 % e independente das variações no volume causadas pela espessura da camada, os valores de massa encontrados para cada um dos corpos de prova analisados, encontram-se abaixo do valor teórico calculado para um componente sólido fabricado em PLA. Observa-se ainda, que as Situações 4, 5, e 6, com a espessura de camada de 0,3 mm, apresentaram o melhor comportamento quando comparadas ao valor teórico.

De acordo com Li *et al.* (2002a), apresentado no item 2.2.3.1, as peças fabricadas por FDM são compostas por filamentos depositados e vazios. A partir desse conceito, buscou-se relacionar uma característica natural do processo — a presença de vazios nas peças —, para entender a redução da massa dos corpos de prova fabricados nesta pesquisa. Além dos vazios causados pelas características do processo de fabricação, a pesquisa buscou relacionar a redução da massa das peças, sobretudo, à presença de vazios causados por falhas na estrutura construída.

Para demonstrar a relação entre a redução da massa e a presença de vazios foi selecionada como exemplo a situação três, Tabela 14, onde se obteve o maior desvio entre valores medidos para cada um dos três corpos de prova e a média. As imagens microscópicas, Figuras 48 e 49, mostram o aumento na presença de vazios da primeira e a segunda amostra da Situação 3, na qual se verificou uma redução da massa de 6,28 g para 5,61 g, isto é, uma redução percentual de aproximadamente 11 %.

Figura 48 – Imagem microscópica da superfície do topo, CP1 da Situação 3 (massa = 6,28 g).

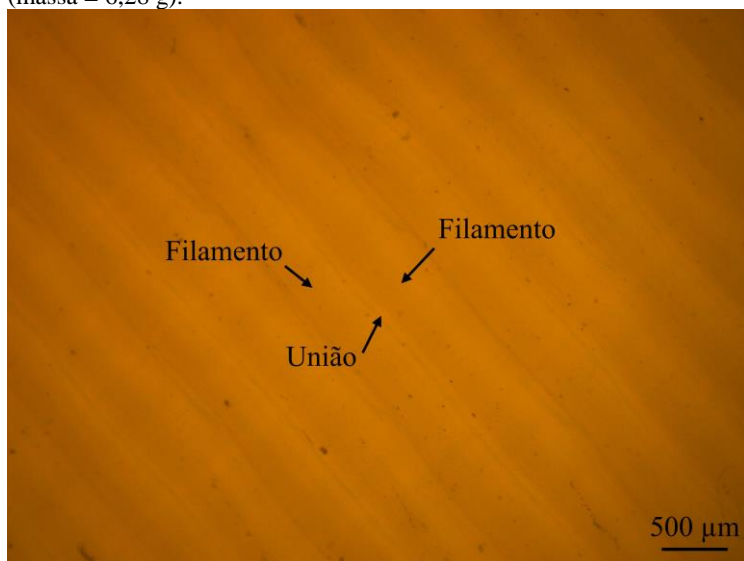
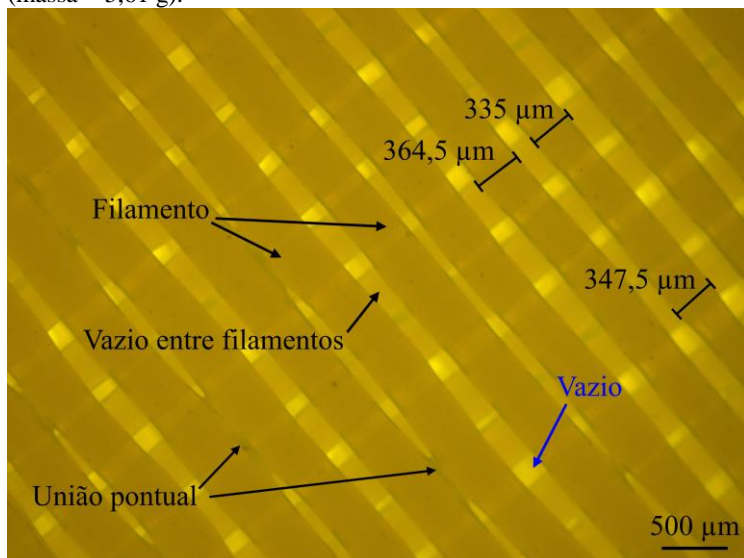


Figura 49 - Imagem microscópica da superfície do topo, CP2 da Situação 3 (massa = 5,61 g).



A comparação entre as imagens apresentadas nas Figuras 48 e 49 mostra que a presença de vazios na amostra 2 (CP2) da Situação 3, é resultado de erros do processo, os quais geraram falhas de conexão entre os filamentos adjacentes, que deveriam ter contato físico, em função do ajuste de 100 % de preenchimento. Observa-se também em destaque na Figura 48 a presença de vazios nas camadas internas da peça, identificados pela passagem de luz emitida pelo equipamento de análise.

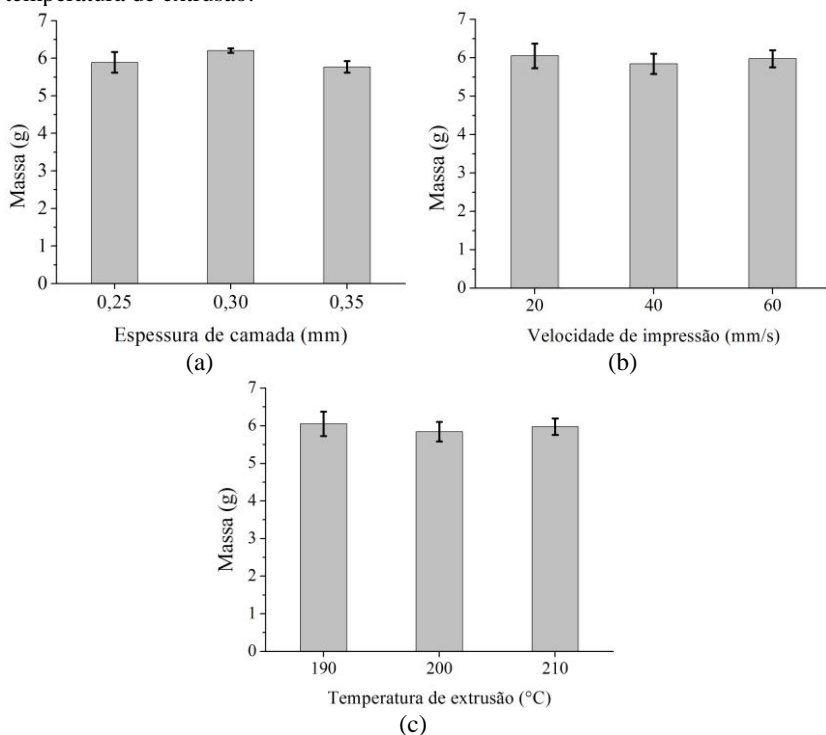
Os filamentos depositados na amostra 2 da Situação 3 apresentam também variações dimensionais ao longo da sua trajetória e entre os filamentos. A menor largura do filamento medida foi em torno de 37 % abaixo do valor calculado pelo *software* Slic3r — de 0,530 mm para 0,335mm. As variações dimensionais no filamento depositado indicam falhas no fluxo de material depositado.

De maneira geral pode-se concluir que a maior ou menor quantidade de vazios na estrutura fabricada, decorrente de falhas de deposição ou da ausência de formação da ligação entre os filamentos, é responsável pelas variações nos valores de massa encontrados, tanto entre as amostras pertencentes ao mesmo conjunto de parâmetros, ou quando comparadas a um valor teórico de massa.

Com base nas médias das massas obtidas para cada nível associado aos parâmetros de processo estudados, foi possível ainda identificar quais níveis gerariam as maiores massas. Respectivamente, para espessura de camada, velocidade de impressão e temperatura de extrusão, os seguintes valores: 0,3 mm, 20 mm/s e 190 °C, conforme mostrado nos gráficos da Figura 50.

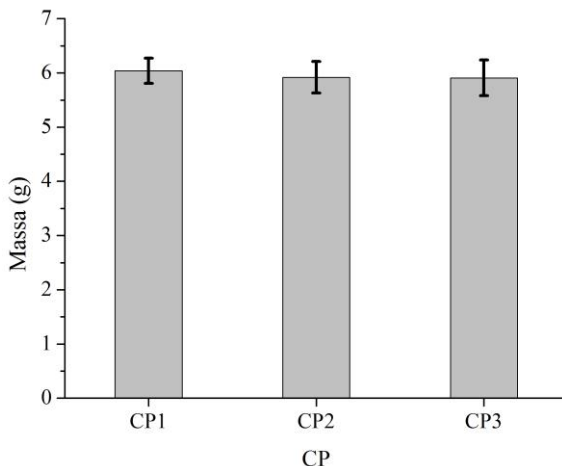
No entanto, os gráficos mostram também não haver diferenças estatísticas relevantes entre as massas médias obtidas com as variações de espessura de camada, velocidade de impressão, e temperatura de extrusão. Um dos motivos pelos quais não foram observadas diferenças estatísticas foram as variações na resposta, principalmente em peças configuradas com os mesmos parâmetros de processo. A diversificação em torno de um valor de tendência interferiu na análise estatística dos dados.

Figura 50 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros sobre a média das massas, (a) espessura da camada, (b) velocidade de impressão, e (c) temperatura de extrusão.



Devido às divergências entre os valores de massas encontrados entre as amostras configuradas com os mesmos parâmetros, buscou-se avaliar a variação da massa em função da ordem de fabricação dos corpos de prova. Os resultados apresentados no gráfico da Figura 51 correspondem aos valores médios de massa por etapa de construção, representados respectivamente por CP1, CP2, e CP3.

Figura 51 – Variação da massa em função da ordem de fabricação.



O gráfico da Figura 51 considera todos os valores de massa obtidos em cada sequência de fabricação. Em relação aos valores médios, observa-se que as amostras construídas na primeira etapa de fabricação apresentaram maior massa do que as peças fabricadas na segunda e terceira etapas. No entanto a diferença entre os valores médios por ordem de fabricação é pequena, aproximadamente 2,2 % entre a massa média das amostras fabricadas na primeira (6,04 g) e terceira etapas (5,91 g). Analisando-se ainda os desvios em relação à média das massas, os valores obtidos nas três etapas são estatisticamente semelhantes.

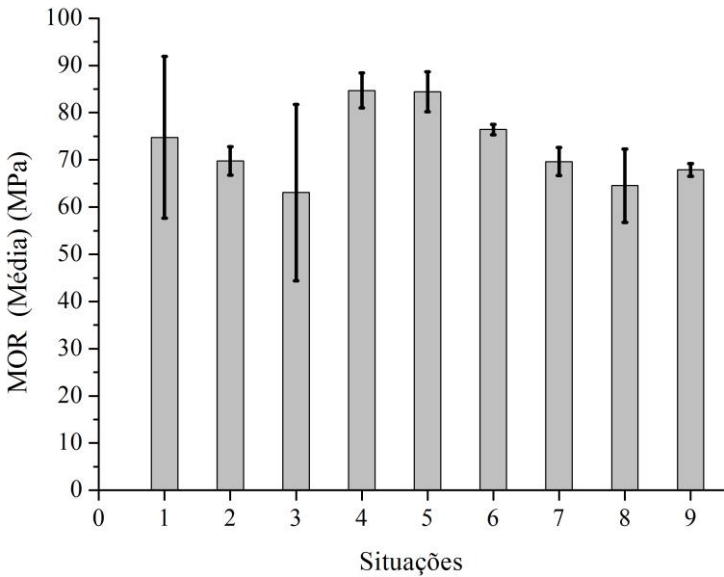
Em relação às menores massas encontradas (Tabela 14, coluna m), em 44,4 % dos casos, estão relacionadas ao terceiro corpo de prova fabricado (CP3), seguidos pelos valores obtidos nas segundas amostras (CP2), com 33,3 %, e nas primeiras (CP1), com 22,2 %. Já para as maiores massas (Tabela 14, coluna M), aproximadamente 56 % dos valores estão associados à primeira amostra fabricada da sequência, e 44 % das maiores massas estão relacionadas aos corpos de prova fabricados na segunda (22 %) e terceira etapas (22 %).

Os resultados expostos na Tabela 16, correspondentes aos valores de módulo de ruptura (MOR), obtidos no ensaio de flexão. Os valores médios do módulo de ruptura e os desvios padrão associados, encontram-se representados também na Figura 52.

Tabela 16 – Resultados da medição do módulo de ruptura (MOR).

Situações	Código	MOR (MPa)						
		CP1	CP2	CP3	\bar{X}	σ	M	m
1	E1V1T1	90,40	77,50	56,47	74,79	17,13	90,40	56,47
2	E1V2T2	70,31	66,54	72,48	69,78	3,01	72,48	66,54
3	E1V3T3	84,60	53,86	50,83	63,10	18,69	84,60	50,83
4	E2V1T2	86,21	87,38	80,47	84,69	3,70	87,38	80,47
5	E2V2T3	88,43	79,99	84,85	84,43	4,24	88,43	79,99
6	E2V3T1	75,45	77,64	76,2	76,43	1,11	77,64	75,45
7	E3V1T3	70,00	66,53	72,42	69,65	2,96	72,42	66,53
8	E3V2T1	73,53	60,17	59,97	64,56	7,77	73,53	59,97
9	E3V3T2	69,08	66,44	68,18	67,90	1,34	69,08	66,44

Figura 52 - Representação do módulo de ruptura médio, obtido em cada Situação.



A qualidade da união entre os filamentos adjacentes é um importante fator na determinação das propriedades mecânicas de peças obtidas por FDM (BELLEHUMEUR *et al.*, 2004; BELLINI, 2002). A análise dos resultados encontrados na pesquisa, apresentados na

Tabela 16, associada às imagens microscópicas, permitem comprovar esta afirmação.

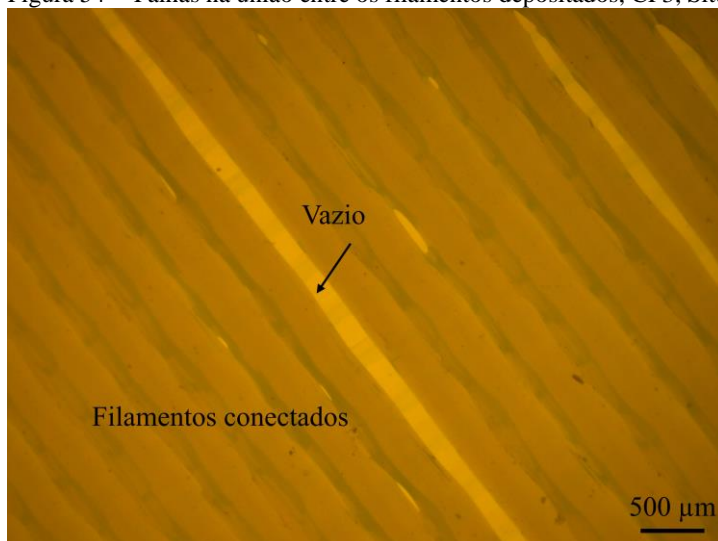
Assim como na medição das massas, as amostra construídas segundo o conjunto de parâmetros da Situação 3 apresentaram o menor valor de módulo de ruptura e a maior dispersão de valores, considerando a média. Uma comparação entre o módulo de ruptura encontrado na primeira e na segunda amostra fabricada na Situação 3 — (84,60 e 53,86) MPa respectivamente —, há uma redução percentual de cerca de 36 % no valor encontrado, decorrente da formação de ligações pontuais, ou, principalmente, da falta delas, entre os filamentos depositados na peça 2, conforme ilustrado na Figura 49.

As peças onde se obtiveram o maior valor médio do módulo de ruptura (Situação 4) apresentaram uma qualidade melhor na conexão entre os filamentos vizinhos (Figura 53), quando comparadas as peças com menor resistência mecânica. Para ilustrar a influência da qualidade da ligação entre os filamentos sobre a resistência mecânica, na Situação 4, o CP3, que obteve o menor módulo de ruptura quando comparado aos demais valores, apresentou pequenas falhas na conexão entre os filamentos (Figura 54).

Figura 53 – Superfície homogênea, no topo do CP1, Situação 4.

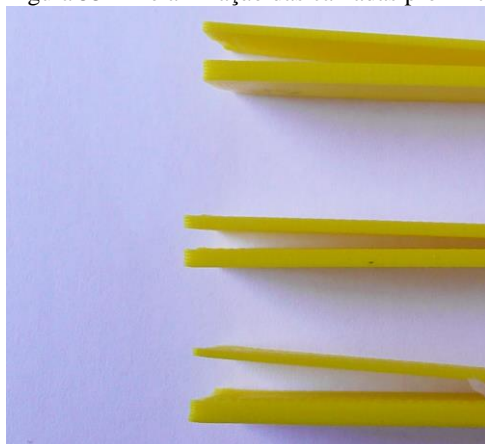


Figura 54 - Falhas na união entre os filamentos depositados, CP3, Situação 4.



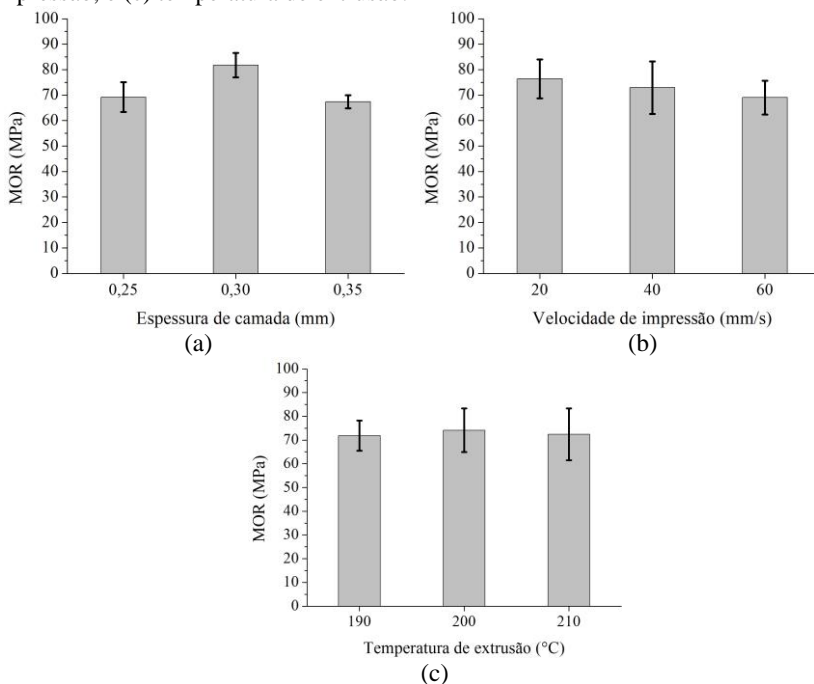
Outra característica evidenciada nos ensaios de flexão, e que remete à qualidade da união entre os filamentos (neste caso na adesão entre camadas), foi o delaminação das camadas mais próximas ao topo das peças, à medida que a força era aplicada durante o teste. Esse efeito foi predominante nas peças fabricadas com o PLA amarelo, e pode ser visto na Figura 55.

Figura 55 – Delaminação das camadas próximas ao topo das peças.



Assim como na medição das massas, foi possível também indicar os níveis de cada parâmetro estudado, com base no valor médio, que maximizaram os valores de módulo de ruptura. Neste caso os valores para espessura de camada, velocidade de impressão e temperatura de extrusão foram respectivamente: 0,3 mm, 20 mm/s e 200 °C, como apresentado nos gráficos da Figura 56.

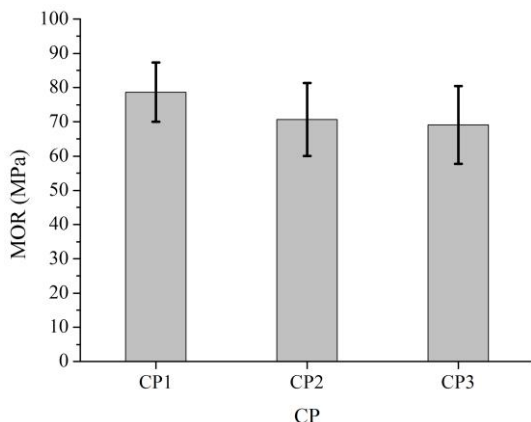
Figura 56 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros sobre a média do módulo de ruptura, (a) espessura de camada, (b) velocidade de impressão, e (c) temperatura de extrusão.



Os gráficos apresentados na Figura 56 indicam, assim como para as massas, que os valores médios de módulo de ruptura associados aos níveis dos parâmetros de processo avaliados são estatisticamente iguais. O fato também está relacionado à variabilidade nos valores em torno da média, os quais são maiores quando comparados aos desvios em relação à massa para as amostras pertencentes ao mesmo grupo de parâmetros.

Em relação à ordem de fabricação os valores médios de módulo de ruptura são apresentados no gráfico da Figura 57.

Figura 57 – Variação do módulo de ruptura em função da ordem de fabricação.



As amostras fabricadas na segunda e terceira etapa apresentaram respectivamente uma redução percentual, no valor médio, de 10 % e 12 % em relação às peças fabricadas na primeira etapa. No entanto a variação do módulo de ruptura em função da ordem de fabricação, considerando os desvios em relação à média, mostra que não houve diferenças estatísticas entre as etapas.

Considerando apenas os maiores módulos de ruptura (Tabela 16, coluna M), em 56 % dos casos foram atribuídos aos CPs fabricados na primeira etapa de construção. As etapas dois e três apresentaram igualmente dois corpos de prova com maior módulo de ruptura. Em relação aos menores valores (Tabela 16, coluna m), apenas um corpo de prova foi relacionado à primeira etapa; a segunda e a terceira etapa apresentaram juntas 88 % dos casos de menor módulo de ruptura.

Como o estudo envolveu a variação de parâmetros de processo, foi realizada uma análise de variância para medir a significância desses parâmetros sobre os valores de massa e módulo de ruptura obtidos nos experimentos realizados. As Tabelas 17 e 18 apresentam respectivamente a análise de variância para mediação da massa e do módulo de ruptura, em função da espessura de camada (EC), velocidade de impressão (VI), e temperatura de extrusão (TE).

Tabela 17 – Análise de variância para a massa.

Parâmetros	GL	SQ	V	F	P
EC (mm)	2	0,304	0,152	6,97	0,125
VI (mm/s)	2	0,096	0,048	2,20	0,312
TE (°C)	2	0,067	0,034	1,54	0,393
Erro	2	0,044	0,022		
Total	8	0,511			

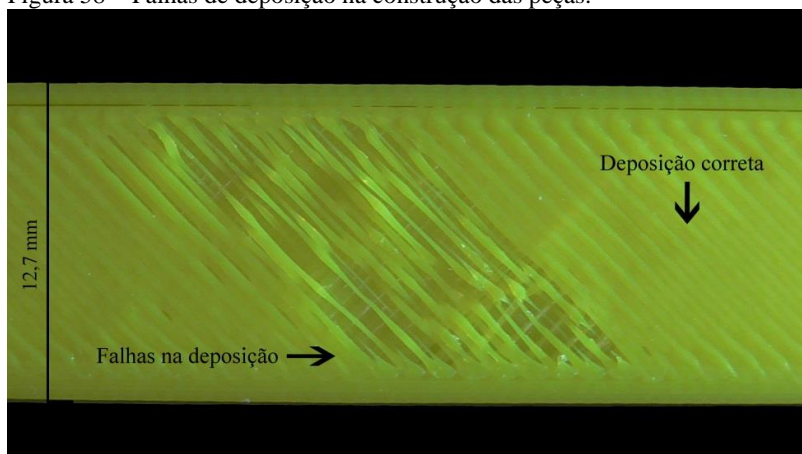
Tabela 18 – Análise de variância para o módulo de ruptura.

Parâmetros	GL	SQ	V	F	P
EC (mm)	2	372,488	186,244	9,38	0,096
VI (mm/s)	2	78,539	39,27	1,98	0,336
TE (°C)	2	8,023	4,01	0,2	0,832
Erro	2	39,722	19,86		
Total	8	498,771			

A análise de variância indica que os fatores analisados — espessura de camada, velocidade de impressão, e temperatura de extrusão —, não apresentam influência significativa para um nível de confiança de 95 % sobre as repostas avaliadas — massa e módulo de ruptura. Porém é importante ressaltar que a análise estatística foi influenciada pelas variações nos valores obtidos de massa e módulo de ruptura, principalmente entre as amostras configuradas com o mesmo conjunto de parâmetros de processo, que dificultam afirmar que realmente os fatores avaliados no estudo não tenham influência sobre a massa e a resistência mecânica das peças.

Mediante uma primeira análise meramente visual, durante o processo de fabricação, a presença de falhas aparentes de deposição foi um critério para o descarte de peças. As falhas foram constatadas em regiões com três diferentes condições: onde cabeçote realizou as trajetórias sem depositar material, onde os filamentos se encontram mais finos que os demais, ou onde há variações na quantidade de material depositado. A Figura 58 representa uma amostra que foi descartada em virtude de falhas de deposição aparentes.

Figura 58 – Falhas de deposição na construção das peças.



Contudo, não é possível assegurar que apenas a inspeção visual tenha evitado a presença das falhas nas peças usadas para o estudo, uma vez que podem ter ocorrido em camadas internas e recobertas pelas camadas posteriores. Diante do exposto é importante uma justificativa sobre as peças que foram analisadas nos experimentos descritos anteriormente. Nenhuma das amostras avaliadas no primeiro estudo de caso apresentou falhas perceptíveis nas superfícies do topo e base. No entanto quando avaliadas microscopicamente, observou-se um padrão de falhas entre os filamentos depositados que motivou a análise do comportamento mecânico e medição da massa em função de problemas na deposição dos filamentos.

4.4 ESTUDO DE CASO DE FABRICAÇÃO: PLA NATURAL A

O primeiro estudo de caso realizado indicou um comportamento aleatório nas respostas encontradas — massa e módulo de ruptura — a partir de análises dos corpos de provas construídos com os mesmos parâmetros de processo. Diante do exposto, uma segunda etapa de fabricação de peças foi desenvolvida, com o intuito principal de verificar a repetibilidade de construção do equipamento.

Conforme foi mencionado na seção 3.4.2, e apresentado na Tabela 7, os corpos de prova construídos com o mesmo conjunto de parâmetros foram fabricados seguindo a aleatoriedade proposta pelo delineamento experimental. A Tabela 19 apresenta os valores de massa obtidos no segundo estudo.

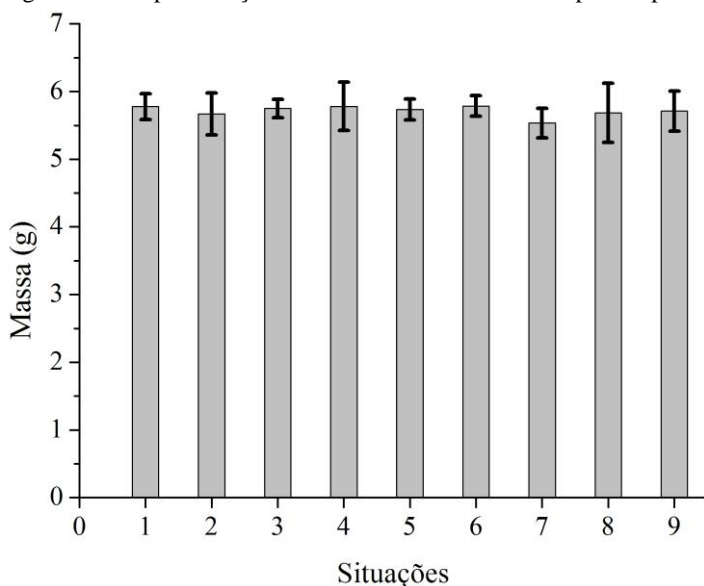
Como pode ser observado, optou-se por apresentar os resultados reunindo sequencialmente os valores encontrados para as amostras fabricadas com os mesmos parâmetros, com o objetivo de facilitar a apresentação e visualização dos dados. Foi estabelecida também uma sequência numérica, de 1 a 9, para indicar nas discussões sobre os resultados o conjunto de peças referido.

Tabela 19 – Resultado da medição da massa dos corpos de prova fabricados, segundo estudo de caso.

Situação	Código	Massa (g)						
		CP1	CP2	CP3	\bar{X}	σ	M	m
1	V1T1	5,88	5,56	5,89	5,78	0,19	5,89	5,56
2	V1T2	5,68	5,36	5,97	5,67	0,31	5,97	5,36
3	V1T3	5,90	5,63	5,72	5,75	0,14	5,90	5,63
4	V2T1	6,17	5,48	5,69	5,78	0,35	6,17	5,48
5	V2T2	5,91	5,69	5,61	5,74	0,16	5,91	5,61
6	V2T3	5,86	5,89	5,61	5,79	0,15	5,89	5,61
7	V3T1	5,76	5,32	5,53	5,53	0,22	5,76	5,32
8	V3T2	5,93	5,18	5,94	5,68	0,44	5,94	5,18
9	V3T3	5,87	5,37	5,89	5,71	0,29	5,89	5,37

Os valores médios de massa, por Situação, e os respectivos desvios padrão, encontram-se representados graficamente na Figura 59.

Figura 59 – Representação da massa média e os desvios padrão por Situação.



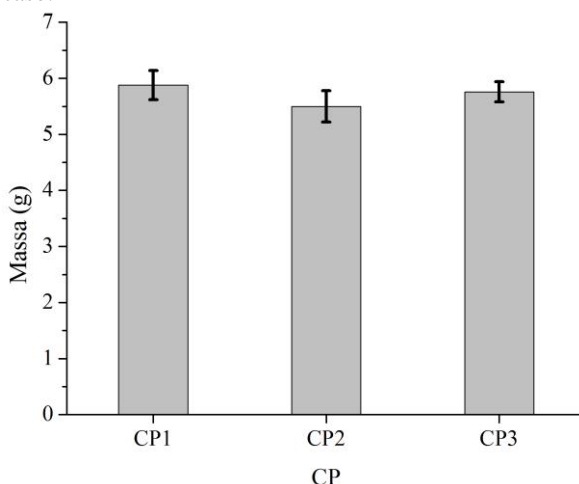
Os resultados apresentados na medição da massa das amostras indicam (Tabela 19) , assim como no primeiro estudo de caso, a presença de um comportamento heterogêneo entre os valores encontrados para as peças pertencentes ao mesmo grupo parâmetros de processo. Em algumas situações, porém, se analisado individualmente cada valor de massa encontrado, é possível observar que dos três corpos de prova construídos, dois deles apresentam valores bem próximos. As Situações 1, 6, 8 e 9 ocorreram como descrito anteriormente.

Observou-se que nos casos citados anteriormente, em três das quatro Situações, o menor valor de massa foi atribuído ao corpo de prova construído na segunda etapa de fabricação. A partir da constatação, em uma análise isolada dos corpos de prova que apresentaram os menores valores de massa quando comparados ao demais (Tabela 19, coluna m) mostra que 78 % dos casos as amostras construídas na segunda etapa de fabricação (Tabela 19, CP2) foram os que apresentaram as menores massas, seguido pela terceira etapa (Tabela 19, CP3), com 22 %. Em nenhum dos casos, a primeira etapa de construção (Tabela 19, CP1) apresentou o menor valor de massa.

Considerando as maiores massas obtidas (Tabela 19, coluna M), os corpos de prova fabricados na primeira (Tabela 19, CP1) e terceira etapa (Tabela 19, CP3) apresentaram igualmente 44 % das maiores

massas, 88 % do total de casos. Em apenas uma ocasião (Situação 6) a amostra com maior massa apresentada foi construída na segunda etapa (Tabela 19, CP2), resultando em 2 % dos casos. O gráfico da Figura 60 representa, com base na média da massa de todos os corpos de prova fabricados, o comportamento da variação da massa por etapa de fabricação, representadas respectivamente por CP1, CP2 e CP3.

Figura 60 – Variação da massa por ordem de fabricação, segundo estudo de caso.



O gráfico da Figura 60 mostra que, com base nas médias, os valores de massa diminuíram principalmente nas amostras construídas na segunda etapa de fabricação.

Ainda com relação à avaliação das massas dos corpos de prova no segundo estudo, foi realizada também a comparação entre a média dos valores de massa medidos com um valor teórico de massa para um componente sólido em PLA, Tabela 20. O cálculo da massa teórica considerou a densidade do material, medida na etapa de caracterização dos materiais, e apresentada na seção 4.2.

Tabela 20 – Comparação entre a massa medida e a massa calculada, segundo estudo de caso.

Código	Média das massas (g)	Massa calculada (g)	Desvio (%)
V1T1	5,78	6,58	-12,13
V1T2	5,67	6,58	-13,77

Tabela 20 - Comparação entre a massa medida e a massa calculada, segundo estudo de caso (Continuação).

V1T3	5,75	6,58	-12,55
V2T1	5,78	6,58	-12,07
V2T2	5,74	6,58	-12,76
V2T3	5,79	6,58	-12,00
V3T1	5,53	6,58	-15,83
V3T2	5,68	6,58	-13,56
V3T3	5,71	6,58	-13,17

No segundo estudo de caso também pode ser observado que a massa das amostras fabricadas por fusão e deposição de material, e configuradas no *software* de planejamento do processo com densidade de preenchimento 100 %, encontram-se abaixo do valor teórico. Os desvios percentuais em relação ao valor teórico foram maiores no segundo estudo de caso, se comparados aos desvios no primeiro estudo, desconsiderando a variação da espessura da camada, e analisando apenas a densidade dos materiais, que são muito próximas, e pelo ajuste do preenchimento.

Os resultados obtidos na medição da massa foram submetidos à análise de variância a fim de verificar se os parâmetros de processo manipulados no experimento teriam efeito significativo sobre a resposta avaliada. Com base nos dados obtidos, constatou-se que os parâmetros velocidade de impressão e temperatura de extrusão não apresentaram influência significativa sobre a massa das peças (Tabela 21). Deve-se, contudo, considerar a influência da variabilidade em torno dos valores médios de massa, em amostras fabricadas com os mesmos parâmetros de processo, sobre a análise estatística.

Tabela 21 – Análise de variância para massa, segundo estudo.

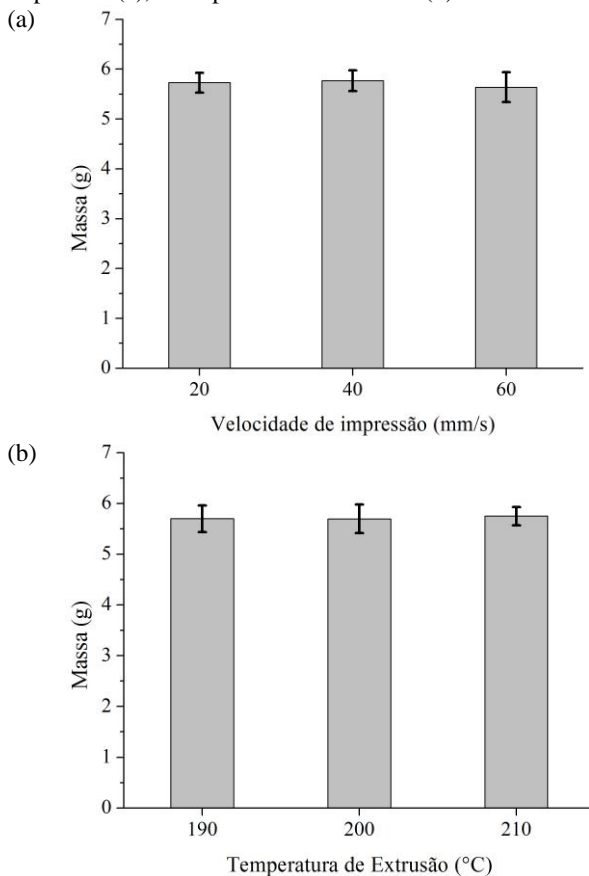
Fator	GL	SQ	V	F	P
VI (mm/s)	2	0,08	0,04	0,61	0,553
TE (°C)	2	0,02	0,01	0,13	0,880
Erro	22	1,36	0,06		
Total	26	1,45			

Por fim, os gráficos da Figura 61 (a) e (b) representam respectivamente a variação da massa média em função dos níveis de

velocidade de impressão e temperatura de extrusão. Os melhores resultados foram obtidos com velocidade de impressão (VI) de 40 mm/s, e temperatura de extrusão (TE) de 210 °C.

Os gráficos confirmam, através da representação dos desvios padrão em torno da média, que não há diferença estatística entre os valores de massa em função da variação dos parâmetros de processo avaliados.

Figura 61 – Variação da massa em função dos níveis de velocidade de impressão (a), e temperatura de extrusão (b).



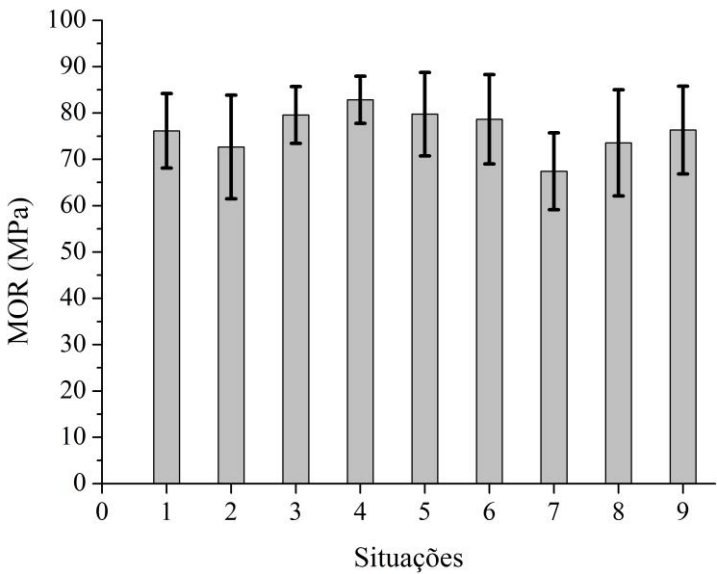
As amostras fabricadas no segundo estudo, assim como no primeiro estudo de caso, foram submetidas a ensaio de flexão, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 22. O gráfico da Figura

62 representa o módulo de ruptura médio por Situação, e os desvios padrão em torno dos valores.

Tabela 22 – Resultados para o módulo de ruptura (MOR), segundo estudo de caso.

Situação	Código	MOR (MPa)						
		CP1	CP2	CP3	\bar{X}	σ	M	m
1	V1T1	82,83	67,23	78,37	76,14	8,04	82,83	67,23
2	V1T2	76,78	59,98	81,21	72,66	11,2	81,21	59,98
3	V1T3	86,30	74,23	78,17	79,57	6,15	86,3	74,23
4	V2T1	88,64	79,14	80,8	82,86	5,07	88,64	79,14
5	V2T2	87,41	81,98	69,86	79,75	8,98	87,41	69,86
6	V2T3	82,4	85,88	67,67	78,65	9,67	85,88	67,67
7	V3T1	76,98	63,13	62,16	67,42	8,29	76,98	62,16
8	V3T2	82,35	60,57	77,75	73,56	11,48	82,35	60,57
9	V3T3	81,74	65,38	81,84	76,32	9,47	81,84	65,38

Figura 62 – Representação do módulo de ruptura médio e os desvios padrão por Situação.



O efeito de aleatoriedade nas repostas encontradas entre as amostras pertencentes ao mesmo conjunto de parâmetros, assim como na medição da massa, também se fez presente para os valores de módulo de ruptura obtidos. Observa-se também que os desvios padrão apresentados na medição do módulo de ruptura são maiores que os obtidos em relação à variação da massa.

Conforme apresentado na Tabela 22, as Situações 2 e 8 apresentaram, respectivamente, as maiores dispersões de valores em torno da média. Tais Situações também se encontram entre os menores módulos de ruptura médio obtidos, 72,66 MPa (Situação 2) e 73,56 MPa (Situação 8).

A análise da redução percentual entre o maior e o menor valor de módulo de ruptura, por CP, obtido nas Situações descritas, verificou declínio na resistência de 26 % e 27 % para as Situações 2 e 8 respectivamente. Em ambos os casos, o corpo de prova com menor resistência à flexão foi construído na segunda etapa de fabricação.

A variação no módulo de ruptura segundo a ordem do corpo de prova (CP), em um panorama geral, também foi avaliada. Em relação aos maiores módulos de ruptura obtidos (Tabela 22, coluna M), em 78 % dos casos foram associados às amostras construídas na primeira etapa de fabricação. As amostras correspondentes a segunda e terceira etapa de fabricação, juntas somaram 22 % dos maiores módulos de ruptura, o que corresponde a apenas um corpo de prova por ordem de construção.

Considerando os menores módulos de ruptura (Tabela 22, coluna m), 67 % dos valores pertenceram ao grupo de amostras construídas na segunda etapa. Os 33 % dos valores mínimos restantes foram obtidos nas peças fabricadas na terceira etapa. O gráfico da Figura 63 mostra o comportamento do módulo de ruptura, com base em todos os valores médios atingidos em cada etapa de fabricação.

Os resultados apresentados na Figura 63 mostram que, assim como na medição da massa, o módulo de ruptura médio foi menor nas amostras fabricadas na segunda etapa de fabricação. O comportamento do módulo de ruptura em relação aos parâmetros de processo avaliados é representado nos gráficos (a) e (b) da Figura 64.

Figura 63 – Variação do módulo de ruptura (MOR) por ordem de fabricação, segundo estudo de caso.

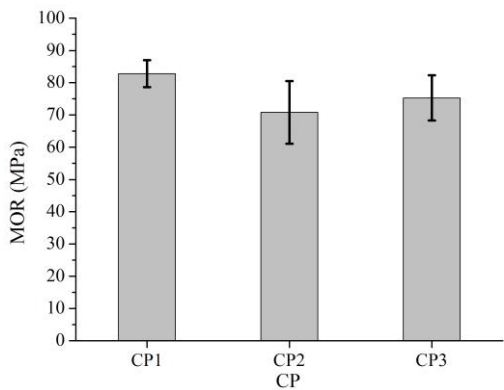
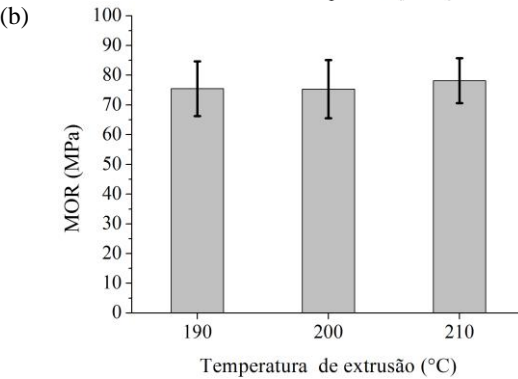
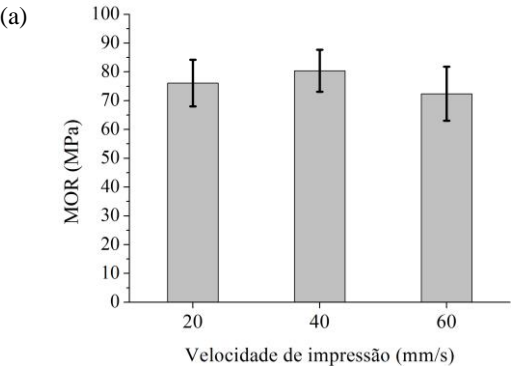


Figura 64 – Variação do módulo de ruptura em relação à velocidade de impressão (a), e temperatura de extrusão (b).



Como podem ser observados os gráficos da Figura 64, os módulos de ruptura médios entre os níveis de velocidade de impressão e temperatura de extrusão, são estatisticamente próximos. Embora se considere que o experimento foi fortemente influenciado pelas variações no módulo de ruptura entre os corpos de prova fabricados com os mesmos parâmetros de processo, observa-se uma condição, baseada na média dos valores, de velocidade de impressão e temperatura de extrusão que gerou melhores resultados. Neste caso os maiores módulos de ruptura foram adquiridos com as peças fabricadas a 40 mm/s e 210 °C.

A seguir é apresentada a análise de variância, Tabela 23, para os valores de módulo de ruptura. O resultado mostra que os parâmetros avaliados não são significativos sobre a resposta, mas deve-se considerar a influência da variabilidade dos valores obtidos sobre a análise estatística.

Tabela 23 – Análise de variância para o módulo de ruptura, segundo estudo.

Fator	GL	SQ	V	F	P
VI (mm/s)	2	287,62	143,81	1,96	0,165
TE (°C)	2	46,47	23,23	0,32	0,732
Erro	22	1614,01	73,36		
Total	26	1948,10			

O ensaio de flexão mostrou que as peças fabricadas com o PLA Natural A, conforme mostrado na Figura 65, apresentaram um comportamento mais rígido, e, portanto, mais frágeis. No entanto as amostras demonstraram uma melhor adesão no sentido de empilhamento das camadas, não evidenciando efeitos de delaminação após a aplicação da carga no ensaio de flexão, Figura 66.

Figura 65 – Ruptura total das amostras no ensaio de flexão.

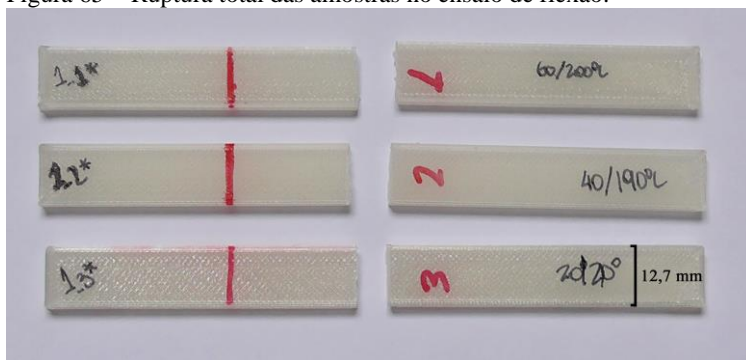
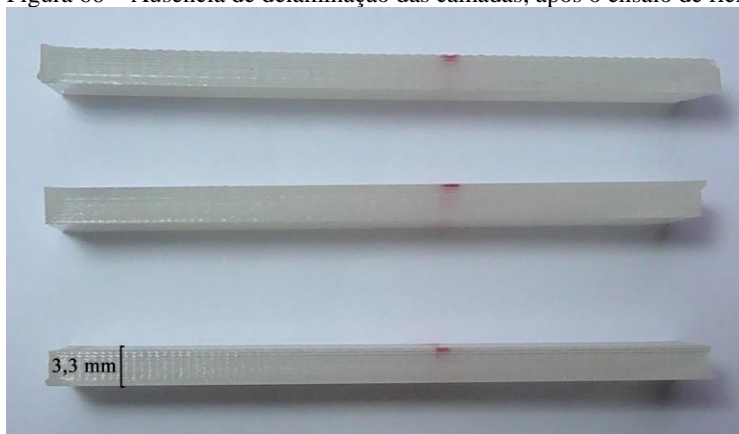


Figura 66 – Ausência de delaminação das camadas, após o ensaio de flexão.



A análise de defeitos entre os filamentos depositados por microscopia óptica, no estudo com PLA natural, foi dificultada devido ao fato de o material ser transparente. No entanto em algumas peças, com o ajuste de contraste nas imagens, foi possível verificar a presença de vazios entre os filamentos, trajetórias sinuosas, e variações dimensionais ao longo da geometria dos filamentos depositados. As Figuras 67 e 68 representam as falhas citadas anteriormente.

Figura 67 – Presença de vazios entre os filamentos depositados.

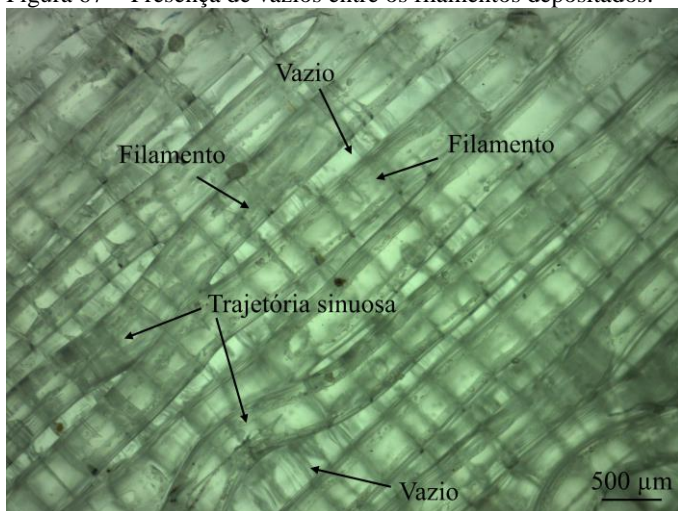
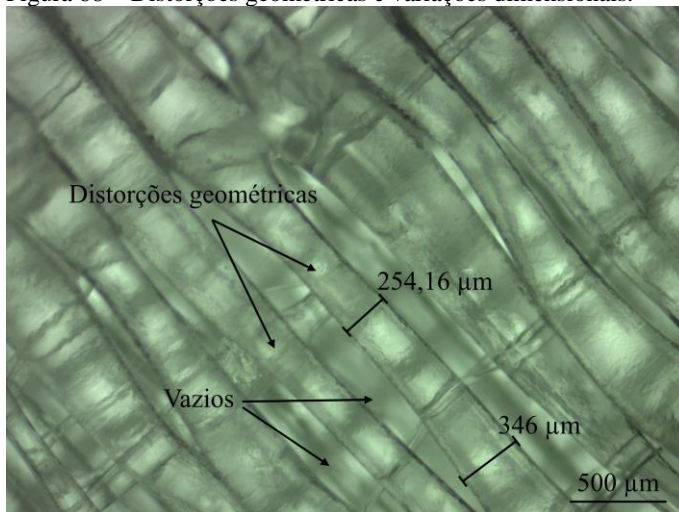


Figura 68 – Distorções geométricas e variações dimensionais.



4.5 AVALIAÇÃO DO CABEÇOTE EXTRUSOR

O estudo de desempenho do cabeçote extrusor identificou um comportamento heterogêneo do sistema durante a execução de sucessivas deposições com as mesmas condições de processamento. Os resultados encontrados mostram falhas na alimentação de material, isto é, variações no comprimento real do filamento a ser extrudado.

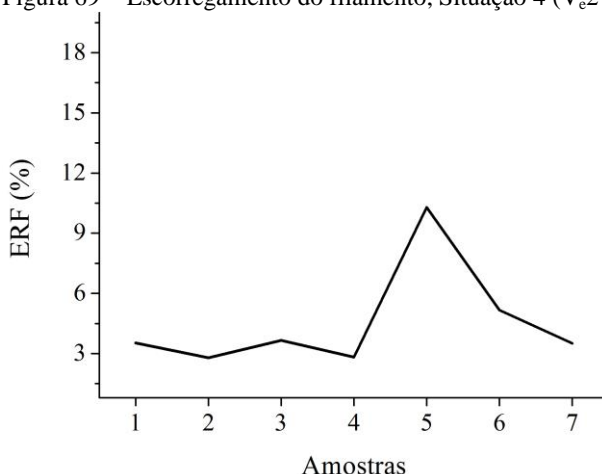
A Tabela 24 apresenta os valores percentuais médios relativos ao escorregamento real no filamento (ERF), perda de comando (PDC), e ao erro total no sistema em relação ao valor comandado via *software* (ETNS), para cada uma das combinações de parâmetros descritas na seção 3.5.

Tabela 24 – Valores percentuais médios de ERF, PDC, e ETNS, por Situação.

Situações	Código	ERF (%)		PDC (%)		ETNS (%)	
		\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
1	V _e 1T1	1,42	1,62	0,00	0,00	1,42	1,62
2	V _e 1T2	2,54	1,58	0,01	0,03	2,55	1,60
3	V _e 1T3	1,63	0,94	0,00	0,00	1,63	0,94
4	V _e 2T1	4,54	2,66	0,17	0,09	4,71	2,73
5	V _e 2T2	1,62	0,51	0,11	0,01	1,74	0,52
6	V _e 2T3	3,44	1,08	0,12	0,01	3,56	1,08
7	V _e 3T1	6,69	0,83	0,16	0,01	6,85	0,82
8	V _e 3T2	3,31	0,39	0,16	0,01	3,47	0,38
9	V _e 3T3	2,41	0,24	0,20	0,08	2,61	0,26
	Maior	6,69	2,66	0,20	0,08	6,85	2,72
	Menor	1,42	0,24	0,00	0,00	1,42	0,26

Com base nos dados apresentados na Tabela 24 foi possível verificar que o escorregamento do filamento sobre o elemento ranhurado do módulo tracionador se caracteriza como um efeito aleatório no sistema. A aleatoriedade é constatada uma vez que os desvios em torno dos valores médios são significativos, principalmente nas Situações com as mesmas configurações de parâmetros.

Para ilustrar a aleatoriedade do escorregamento, Figura 69, foi selecionada a Situação 4 (V_e2T1), onde se obteve o maior desvio padrão.

Figura 69 – Escorregamento do filamento, Situação 4 (V_c2T1).

Conforme mostrado na Figura 69, o escorregamento é variável e independe da ordem das amostras, isto é, não há um aumento na taxa devido ao esforço sequencial ao qual o cabeçote extrusor foi submetido. Dessa forma, tendências sobre o comportamento do escorregamento são difíceis de serem determinadas. Foi realizada a análise de variância com os valores de escorregamento, Tabela 25, com o intuito de estabelecer uma relação entre os resultados obtidos e os parâmetros de processo avaliados — velocidade de extrusão (VE), e temperatura de extrusão (TE).

Tabela 25 – Análise de variância para o escorregamento (ERF).

Fatores	GL	SQ	V	F	P
VE (mm/min)	2	7,832	3,916	1,69	0,294
TE (°C)	2	5,951	2,976	1,28	0,372
Erro	4	9,291	2,323		
Total	8	23,08			

Em virtude das variações nos valores do escorregamento, a análise de variância indicou que os parâmetros estudados não são significativos sobre o escorregamento.

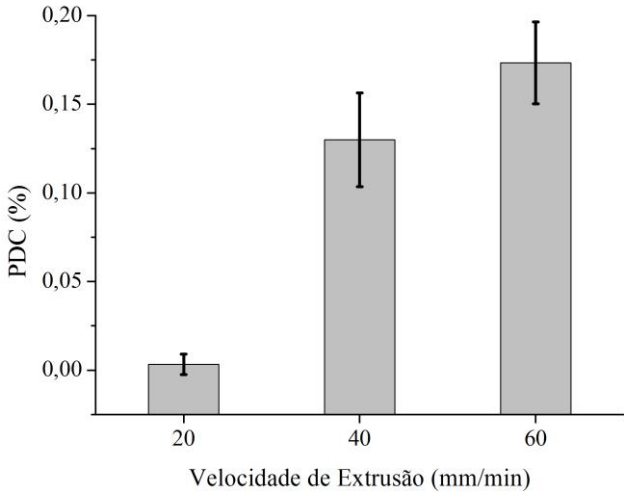
Com relação à perda de comando, observa-se que se caracteriza como um erro linearizado (sistemático), ou seja, sofre poucas variações entre os testes realizados com os mesmos parâmetros de processo. De

acordo com a análise de variância, o efeito de perda de comando é influenciado pela velocidade de extrusão, conforme a Tabela 26. À medida que a velocidade de extrusão aumenta, a perda de comando tende a ser maior, como mostrado no gráfico da Figura 70.

Tabela 26 – Análise de variância para a perda de comando (PDC).

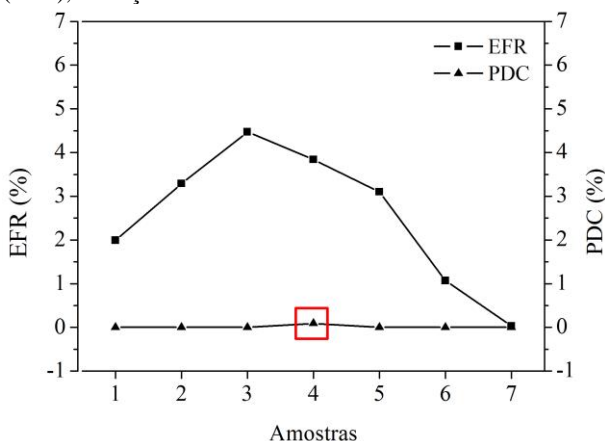
Fatores	GL	SQ	V	F	P
VE (mm/min)	2	0,0468	0,0234	43,00	0,002
TE (°C)	2	0,0004	0,0001	0,33	0,739
Erro	4	0,0022	0,0005		
Total	8	0,0494			

Figura 70 – Variação da perda de comando média (PDC) em função da velocidade de extrusão.



O escorregamento real do filamento (ERF) e a perda de comando são efeitos que não interferem entre si. Em outras palavras, um aumento ou redução na perda de comando não significa um efeito proporcional no escorregamento. O gráfico da Figura 71, correspondente a Situação 2 (V1T2), representa a situação descrita anteriormente. Como pode ser observada, a Amostra 4 foi afetada pela perda de comando, com um valor de perda de 0,09%. No entanto, o maior escorregamento foi associado à Amostra 3, onde a perda de comando foi nula.

Figura 71 – Comparação entre a perda de comando e o escorregamento real (ERF), Situação 2.



Apesar de o escorregamento real do filamento (ERF) e a perda de comando não interferirem entre si, são efeitos que se somam, tendo impacto direto sobre o comprimento de filamento alimentado no cabeçote. O efeito conjunto dos efeitos ERF e PDC é representado na Tabela 24, pela coluna dos valores médios de ETNS, que correspondem ao comportamento real do sistema de extrusão. O comprimento de filamento médio teoricamente deslocado pelo motor (CT), e o comprimento efetivo médio alimentado no sistema (CE) são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Comprimento de filamento teórico e efetivo.

Situações	Código	PDC		ETNS	
		CT (mm)		CE (mm)	
		\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
1	V _e 1T1	100,00	0,00	98,58	1,62
2	V _e 1T2	99,99	0,03	97,45	1,60
3	V _e 1T3	100,00	0,00	98,37	0,94
4	V _e 2T1	99,83	0,09	95,29	2,73
5	V _e 2T2	99,89	0,01	98,26	0,52
6	V _e 2T3	99,88	0,01	96,44	1,08
7	V _e 3T1	99,84	0,01	93,16	0,82

Tabela 27 – Comprimento do filamento teórico e efetivo (Continuação).

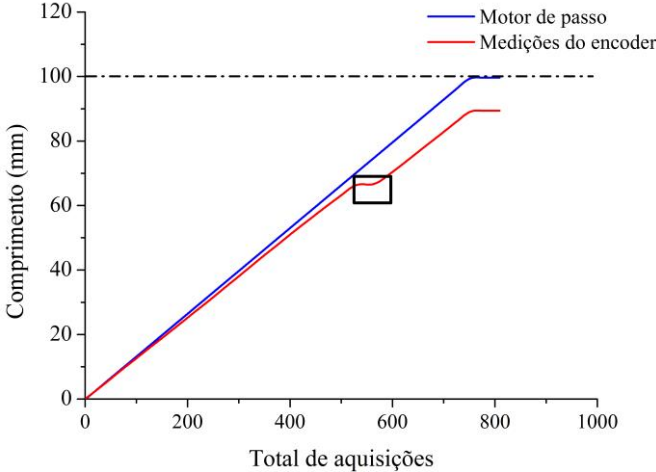
8	V _e 3T2	99,84	0,01	96,54	0,38
9	V _e 3T3	99,80	0,08	97,39	0,26
Maior		100,00	0,09	98,58	2,73
Menor		99,80	0,00	93,16	0,26

As informações da Tabela 27 mostram que as variações no comprimento do filamento alimentado, em função da perda de comando, são menores quando comparados ao comprimento efetivo gerado em função do somatório entre ERF e PDC. Os resultados mostram que o fato de o motor se deslocar, relativo a um determinado comprimento de filamento para ser extrudado (independentemente dos efeitos da perda de comando), não significa que a quantidade de material resultante seja efetivamente alimentada no sistema de extrusão.

Os resultados indicam ainda que os efeitos do escorregamento do filamento são mais relevantes para as variações no comprimento do filamento alimentado. Os valores apresentados permitem estabelecer uma relação entre o funcionamento inconsistente do cabeçote extrusor, em função da variabilidade resultante do ERF.

Por fim, para representar a variação do comprimento de filamento alimentado no cabeçote extrusor, são apresentadas as curvas (Figura 72), obtidas diretamente dos dados fornecidos pelo sistema de aquisição.

Figura 72 – Representação do comprimento de filamento deslocado, em função de PDC e ERF.



As curvas apresentadas na Figura 72 correspondem à amostra 5 da Situação 4. A amostra 5 foi selecionada, pois representa claramente o efeito do escorregamento do filamento no sistema de tracionamento. Como pode ser observado em destaque na curva correspondente às medições do encoder, há um degrau em um determinado momento do ensaio, no qual o filamento não se deslocou, mesmo com o motor sendo acionado (representado na curva em azul).

Os resultados obtidos com relação ao comprimento de filamento alimentado ao cabeçote extrusor indicam, para a amostra 5, uma redução percentual de 10,30 % no comprimento de filamento, considerando-se apenas a influência do escorregamento, e de 10,60 % em relação ao valor comandado de 100 mm, quando adicionado os efeitos da perda de comando (aproximadamente 0,30 %).

Todas as informações sobre o estudo de avaliação do cabeçote extrusor, isto é, os valores percentuais por amostra em cada situação, relativos aos efeitos analisados, são reunidas no Apêndice B.

4.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

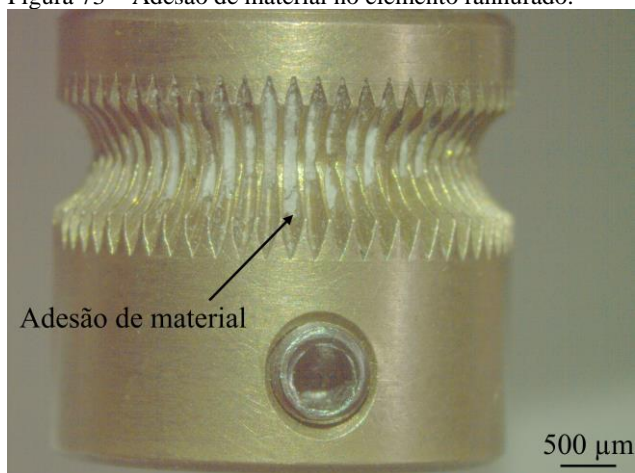
A análise dos resultados encontrados nos estudos de fabricação, avaliação do cabeçote, e dos conceitos abordados nos tópicos 2.2.2 e 2.2.3.3 mostra que as variações nas repostas adquiridas foram causadas por falhas na deposição. Estas impactaram na qualidade do filamento extrudado, que por sua vez tem relação com fatores de configuração de parâmetros, mas também a fatores de *hardware*.

O cabeçote extrusor foi, no caso, um dos fatores de *hardware*, responsáveis pelas falhas na deposição dos filamentos, uma vez que foram comprovados problemas no fornecimento de material ao sistema.

Durante a fabricação das amostras, as partes que compõem o cabeçote extrusor foram alvos constantes de operações de manutenção motivadas por falhas visíveis na deposição, livre ou nas peças, e pela ausência de deposição.

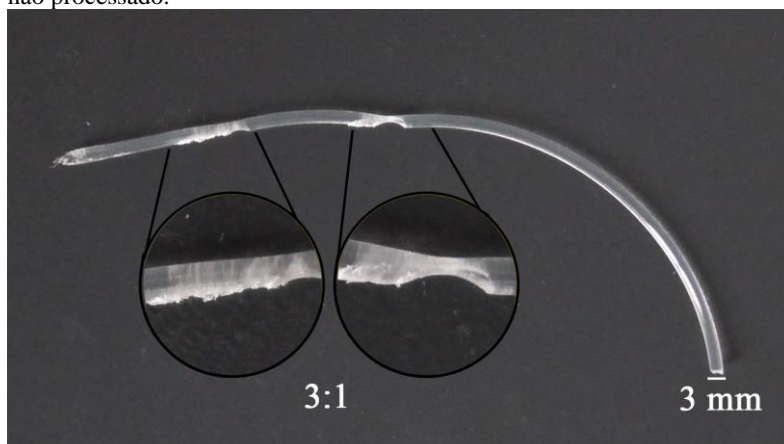
No caso do sistema de tracionamento, as falhas de deposição associadas ocorreram principalmente devido ao escorregamento do filamento alimentado ao sistema extrusor, sobre o elemento ranhurado. Um dos motivos encontrados para justificar o escorregamento foi a presença de material aderido nas ranhuras do elemento, Figura 73, o que reduziu o atrito entre as superfícies do elemento ranhurado e do filamento, impedindo que a ranhura exercesse sua função de agarrar o filamento e empurrá-lo.

Figura 73 – Adesão de material no elemento ranhurado.



A presença de material aderido sobre a polia ranhurada foi um problema citado por Calvente (2013) e Zeyu (2014). Os resíduos de material encontrados nas ranhuras do elemento tracionador foram observados à medida que construções sucessivas de peças eram realizadas. Os resíduos são formados pela remoção de material do filamento não processado pela polia ranhurada, durante a construção das peças, Figura 74.

Figura 74 – Efeitos da remoção de material pela polia ranhurada no filamento não processado.



Os efeitos apresentados na Figura 74 podem ser relacionados ao excesso de pressão no sistema tracionador, que força demasiadamente o elemento ranhurado contra o corpo do filamento, gerando o desgaste do mesmo, ou pelo amolecimento precoce do filamento na entrada do sistema de extrusão, devido ao aquecimento do conjunto. Este aquecimento do conjunto está relacionado às solicitações impostas pelo filamento ao sistema tracionador (inclui o calor gerado pelo motor e conduzido para toda a estrutura) ou pelo esforço excessivo do sistema (pela fabricação sequencial).

Com relação ao ajuste de pressão no tracionador, trata-se de uma variável que influencia a eficiência de alimentação de material no cabeçote extrusor, e consequentemente a qualidade da deposição realizada. De fato o sistema e o método utilizados para regular a pressão são imprecisos e sujeitos a variações devido ao ajuste manual realizado pelo operador (que varia conforme sensibilidade de cada indivíduo), e por questões de variações no diâmetro do filamento ao longo do seu comprimento. Esses fatos fazem com que uma mesma condição de fabricação não seja mantida de uma peça para outra, principalmente quando ocorrem trocas no material de construção (isto é, a troca de um rolo de material por outro), ou por remoção do material do equipamento para que seja armazenado, e depois colocado novamente.

Para constatar e representar as alterações no diâmetro do filamento citadas anteriormente, foram realizadas medições em intervalos de 100 mm, no comprimento do fio, em um total de cinco intervalos. Em cada um dos intervalos, o diâmetro do filamento foi medido a cada 20 mm. As Tabelas 28 e 29 mostram respectivamente os resultados das medições do diâmetro dos filamentos utilizados nos estudos de caso com PLA amarelo e natural A.

Tabela 28 – Medição do diâmetro do filamento, PLA amarelo.

Intervalos	Medições (mm)								
	1	2	3	4	5	Média	σ	VR	Desv.(%)
1	2,93	2,94	2,98	3,01	2,99	2,97	0,03	3,00	-1,00
2	3,25	3,06	2,93	2,95	2,95	3,03	0,13	3,00	0,93
3	2,97	2,98	2,98	3,06	3,02	3,00	0,04	3,00	0,07
4	3,02	3,02	2,99	2,93	3,05	3,00	0,05	3,00	0,07
5	3,05	3,04	3,03	3,00	2,97	3,02	0,03	3,00	0,60

Tabela 29 – Medição do diâmetro do filamento, PLA natural A.

Intervalos	Medições (mm)								Desv. (%)
	1	2	3	4	5	Média	σ	VR	
1	2,85	2,61	2,60	2,59	2,59	2,65	0,11	3,00	-11,73
2	2,86	2,87	2,83	2,85	2,85	2,85	0,01	3,00	-4,93
3	2,85	2,84	2,85	2,84	2,82	2,84	0,01	3,00	-5,33
4	2,88	2,87	2,84	2,83	2,82	2,85	0,03	3,00	-5,07
5	2,83	2,84	2,83	2,84	2,87	2,84	0,02	3,00	-5,27

Quando o usuário do Slic3r inicia o uso do *software*, um dos primeiros parâmetros de entrada solicitados pelo programa é o diâmetro do filamento. Ao inseri-lo o *software* considera o valor configurado como *default* para as características de processo atual e caso o filamento seja mudado, por exemplo, de um diâmetro de 3 mm para 1,75 mm, o usuário deve realizar a alteração do valor na área de configuração destinada ao filamento.

Neste trabalho foi mantido o valor padrão configurado no *software* para um filamento de 3 mm de diâmetro. Entretanto, como mostrado nas Tabelas 28 e 29, os filamentos utilizados apresentam variações no diâmetro ao longo do comprimento. As variações no diâmetro do filamento podem ser consideradas uma das causas para os defeitos internos nas peças, conforme descrito por Agarwala *et al.* (1996), Weeren *et al.* (1995), e Huang (2014).

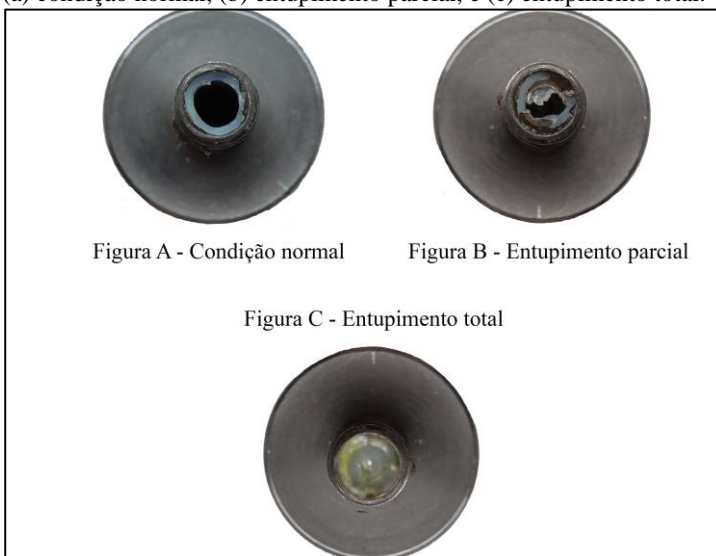
Os corpos de prova construídos, tanto no primeiro quanto no segundo estudo, apresentaram vazios entre os filamentos depositados, alterações no corpo do filamento extrudado ao longo da trajetória e variações na resistência mecânica em função da fraca adesão entre os filamentos. Parte desses defeitos apresentados, foram citados por Agarwala *et al.* (1996), Weeren *et al.* (1995), e Huang (2014). Uma vez que o diâmetro do filamento sofre variações ao longo de seu comprimento, durante a construção, quantidades menores ou maiores de material depositado podem ocorrer, e desta forma os defeitos citados anteriormente acontecem. A inconstância no diâmetro do filamento foi mais significativa para o material utilizado no segundo estudo de caso e, portanto, as variações na massa e resistência mecânica das peças foram consequência, também, da descontinuidade dimensional do filamento.

Ainda sobre a influência do cabeçote de extrusão na qualidade do fluxo de material depositado, a segunda parte que compõe o conjunto,

no caso o bico aquecido, também apresentou problemas em sua estrutura, que acarretaram em falhas no filamento depositado.

Na região de interface entre o corpo de inox e o bloco de aquecimento, observou-se a formação de obstrução, Figura 75, formada devido a dois fatores: deformação do tubo de teflon e entupimento por material residual. Tal efeito, assim como as demais falhas associadas às partes do cabeçote extrusor, foi constatado também devido à fabricação sequencial de peças e ao aquecimento gerado na região (interface), motivado pelo esforço repetitivo sofrido pelo equipamento.

Figura 75 – Obstrução na interface entre o corpo de inox e a região aquecida, (a) condição normal, (b) entupimento parcial, e (c) entupimento total.



Por fim, foi realizada uma estatística geral do trabalho, onde buscou-se verificar: i) quantidade de peças total fabricadas por situação (PPS), em ambos os estudos de caso; ii) quantidade de peças conforme (PCF), sem problemas aparentes; iii) total de peças descartadas por falhas (PFA); iv) tempo de construção médio por peças (TC) e o tempo total de construção por Situações (TTC). As Tabelas 30 e 31 apresentam respectivamente as estatísticas para o primeiro e segundo estudo de caso.

Tabela 30 – Estatística geral do primeiro estudo de caso.

Situação	Código	PPS	PCF	PFA	TC (min)	TTC (min)
1	E1V1T1	3	3	0	56,33	168,99
2	E1V2T2	4	3	1	36,00	108,00
3	E1V3T3	3	3	0	30,75	92,25
4	E2V1T2	8	3	5	48,80	146,40
5	E2V2T3	4	3	1	32,00	96,00
6	E2V3T1	15	3	12	26,72	80,16
7	E3V1T3	8	3	5	41,70	125,10
8	E3V2T1	8	3	5	27,32	81,96
9	E3V3T2	3	3	0	22,00	66,00
Total		56	27	29	321,62	964,86

Tabela 31 – Estatística geral do segundo estudo de caso.

Situação	Código	PPS	PCF	PFA	TC (min)	TTC (min)
1	V1T1	3	3	0	55,10	165,30
2	V1T2	3	3	0	54,70	164,10
3	V1T3	5	3	2	55,40	166,20
4	V2T1	4	3	1	30,00	90,00
5	V2T2	5	3	2	30,00	90,00
6	V2T3	3	3	0	30,00	90,00
7	V3T1	3	3	0	22,50	67,50
8	V3T2	4	3	1	22,20	66,60
9	V3T3	3	3	0	22,40	67,20
Total		33	27	6	322,3	966,90

Os resultados apresentados indicam que o primeiro estudo de caso apresentou um total de peças com falhas aparentes maior que o segundo, de um total de 29 para 6, isto é, uma redução percentual de 79 % no número de falhas. Do total de falhas encontradas no primeiro estudo, a Situação 6 foi a que gerou o maior número de peças com erros, contribuindo com aproximadamente 41% do total. No segundo estudo de caso, a taxa de falhas foi pequena, em torno de 18 %, se comparado ao total de amostras (27) programado para o estudo.

Os tipos de falhas encontradas nas peças foram caracterizadas em cinco grupos, descritos no Quadro 6. Após a identificação dos grupos de falhas, a Tabela 32 apresenta o número de peças em cada um dos estudos de fabricação de peças, descartadas em virtude das falhas descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Grupo de falhas e suas descrições.

Grupo de falhas	Sigla	Descrição
Deposição	DP	Ausência de deposição; filamentos depositados muito finos; desprendimento do material depositado na camada construída anteriormente; "enrugamento das camadas".
Equipamento	EQ	Desnívelamento da plataforma de construção; perda de referência no eixo Z (<i>home</i>); rompimento do material de alimentação (filamento) na entrada do cabeçote extrusor; interrupção repentina do processo por falhas de comunicação entre <i>software</i> e <i>hardware</i> .
Adesão à plataforma de construção	AP	Desprendimento da peça ao longo da construção, ou problemas de adesão da primeira camada à plataforma.
Desvios de forma	DF	Empenamento da peça na região central e nos cantos.
Descartadas para manter a mesma condição	DMC	Em situações onde ocorreram muitos problemas sucessivos as peças consideradas sem problemas aparentes foram descartadas. Isto é, após três ou mais tentativas consecutivas de construção com falhas aparentes nas peças, o equipamento passava por manutenção e todas as amostras construídas eram descartadas, até mesmo eventuais peças aparentemente sem falhas que possam ter sido construídas imediatamente antes das tentativas falhas. Após a estabilização do equipamento, repetia-se a sequência de construção.

Tabela 32 – Total de peças por grupo de falhas nos estudos de caso.

Tipo de falha	Primeiro estudo de caso	Segundo estudo de caso
DP	18	-
EQ	5	4
AP	2	1
DF	1	1
DMC	3	-
Total	29	6

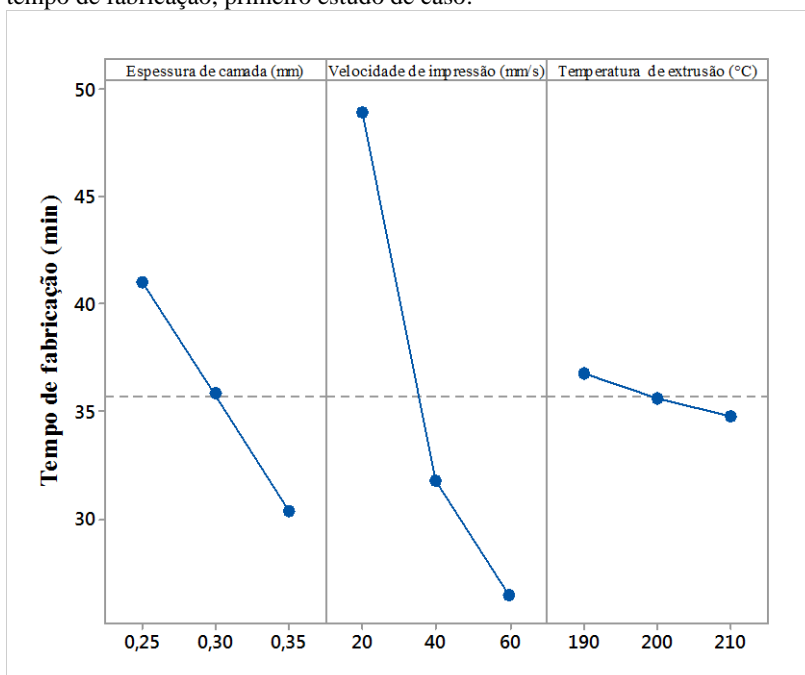
A Tabela 32 mostra que no estudo de caso com o PLA amarelo, o tipo de falha aparente mais frequente foi relacionado à deposição, aproximadamente 63 % dos casos, seguido por problemas do equipamento (17 %). No segundo estudo de caso, Tabela 32, o principal motivo para o descarte de peças foi problemas relacionados ao equipamento, porém falhas na deposição do material não podem ser ignoradas, uma vez que o comportamento das amostras nos ensaios submetidos foi aleatório, principalmente nas peças com a mesma configuração de parâmetros. O fato de o material utilizado no segundo estudo de fabricação ter sido um PLA natural transparente dificultou a análise visual de falhas na deposição.

Em cada Situação do primeiro estudo de caso, o tempo de construção é influenciado pelas variações na velocidade de impressão e na espessura de camada, uma vez que altera o total de camadas a serem construídas, — respectivamente 13, 11, e 9, para 0,25 mm, 0,3 mm, e 0,35 mm de espessura de camada. Isso justifica as diferenças mais evidentes entre as Situações (1 a 9). A análise de variância, Tabela 33, indicou que a velocidade de impressão foi o parâmetro de maior influência no tempo de fabricação, seguido pela espessura de camada. O tempo de fabricação tende a ser maior à medida que a espessura de camada e a velocidade de impressão diminuem, conforme ilustrado no gráfico da Figura 76.

Tabela 33 – Análise de variância para o tempo de construção, primeiro estudo de caso.

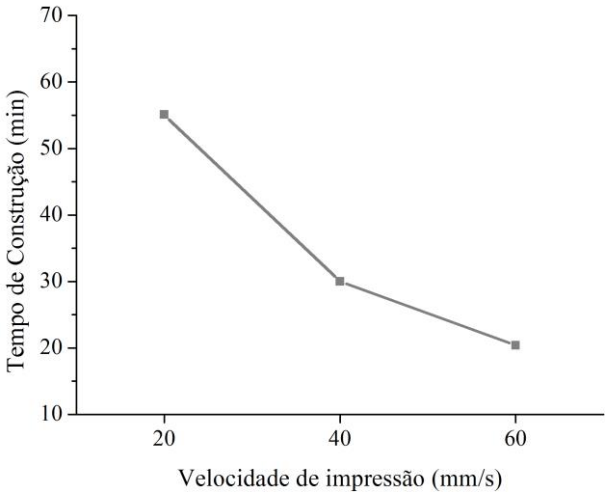
Parâmetros	GL	SQ	V	F	P
EC (mm)	2	171,36	85,68	29,15	0,033
VI (mm/s)	2	826,87	413,44	140,7	0,007
TE (°C)	2	5,92	2,96	1,01	0,498
Erro	2	5,88	2,94		
Total	8	1010,03			

Figura 76 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros sobre o tempo de fabricação, primeiro estudo de caso.



No segundo estudo de caso, como a espessura da camada foi mantida constante, a velocidade de impressão foi o parâmetro determinante na variação do tempo de fabricação. O gráfico da Figura 77 mostra a variação do tempo pela velocidade de impressão no segundo estudo de caso.

Figura 77 – Relação entre os níveis de velocidade e o tempo de construção, segundo estudo de caso.



5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou um estudo de desempenho de um equipamento baseado em projetos de código aberto, para a fabricação de peças por manufatura aditiva, pelo princípio de extrusão de material. Neste contexto foram avaliados efeitos de configuração de parâmetro de processo, características de *hardware*, caracterização dos filamentos de PLA, e a construção de peças.

Os problemas associados ao cabeçote extrusor, destacados nos estudos de Azevedo (2013), Calvente (2013), e Zeyu (2014), foram constatados também na presente pesquisa, sobretudo relacionados à função de deslocar o filamento para ser depositado. Nota-se que os trabalhos que avaliaram o desempenho de impressoras 3D baseadas em projetos de código aberto relataram de forma recorrente limitações do funcionamento do cabeçote extrusor, evidenciando a necessidade de melhora desses dispositivos.

As evidências encontradas no presente estudo corroboraram pesquisas anteriores, que relatam a baixa confiabilidade do cabeçote extrusor, uma vez que o sistema é fortemente influenciado pelo efeito do escorregamento do filamento. Neste trabalho, demonstrou-se, também, em valores percentuais, que o escorregamento se caracteriza por um fator imprevisível e de magnitude aleatória.

Outra contribuição deste estudo foi a identificação dos efeitos da perda de comando de acionamento sobre o fornecimento de material. No entanto o efeito é mais linear e previsível, uma vez que aumenta ou reduz em função da velocidade de extrusão. Por fim, determinou-se a variabilidade das falhas tanto para escorregamento quanto para perda de comando.

Diante do exposto, uma das principais causas atribuídas ao comportamento heterogêneo das peças construídas com os mesmos parâmetros de processo, em relação à massa e principalmente ao módulo de ruptura, foram as falhas no desempenho do sistema responsável pela alimentação de material para ser depositado. Conforme observado, o fornecimento inadequado de filamento, influenciado principalmente pelo efeito do escorregamento, alterou a qualidade do fluxo de material, e, portanto, as dimensões e geometria dos filamentos depositados. Esses efeitos reforçam a importância de um fluxo preciso de material no cabeçote extrusor, sobre a qualidade das peças fabricadas, destacados nos estudos de Agarwala *et al.* (1996) e Langford (2012).

Os defeitos ao longo do filamento depositado geraram vazios, adesão lateral pontual, ou ausência total de união entre os mesmos. O aumento ou redução da massa e do módulo de ruptura foi uma função da extensão das falhas na união dos filamentos no preenchimento. Sendo assim, o efeito negativo se sobrepôs aos parâmetros de processo avaliados na construção das peças — espessura de camada, velocidade de impressão, e temperatura de extrusão.

Apesar de os parâmetros de processo avaliados nos estudos de caso não apresentarem efeitos significativos sobre a qualidade das peças fabricadas, os defeitos nos filamentos depositados devido a problemas na alimentação de material corroboram com a literatura, reforçando que a qualidade da união entre os filamentos é um fator determinante sobre a integridade das peças.

Em relação à variação de material na construção das peças em PLA amarelo e natural A, verificou-se, em ambos os estudos de caso, falhas na união entre os filamentos no interior das camadas. Porém quando analisada a adesão entre as camadas (na direção Z de construção), os componentes fabricados com PLA natural A apresentaram melhor qualidade de união do que os construídos com PLA amarelo.

A interação entre a configuração dos parâmetros de processo e as características de *hardware* foi constatada, ainda, pela relação entre a resolução promovida pelo bico e a espessura da camada. O ajuste da espessura de camada em relação a diâmetro do bico, para valores menores que 80 % do diâmetro sugeridas pela RepRap, de certa forma é relevante. Como foi verificado apesar da variabilidade nas respostas, os melhores valores encontrados para massa e módulo de ruptura foram para espessuras de 0,25 mm e 0,3 mm, sendo mais positivo neste último.

Algumas estratégias de configuração de parâmetros de processo adotadas, por momento, se mostraram ineficazes. O ajuste automático da largura de extrusão (ou do filamento depositado), realizado pelo *software*, trabalha com aproximações de valores, o que muitas vezes gera valores de largura iguais para diferentes espessuras de camada, não garantindo confiabilidade no controle do volume de material a ser depositado.

O uso de um preenchimento de 100 % como estratégia para unir os filamentos lateralmente (*gap* =0) não pode ser efetivamente constatado como positivo ou negativo, uma vez que ocorreram falhas na deposição. Porém evidenciou-se a necessidade de um parâmetro no *software* destinado à configuração de folga ou sobreposição dos filamentos depositados.

A utilização de um *software* livre, como o Slic3r, garante ao usuário uma série de possibilidades de configurações. Porém, em alguns casos, esta liberdade pode ser tornar um fator limitante, uma vez que faltam pontos de referência que permitam ao usuário uma configuração dos parâmetros de processo com maior propriedade.

As constatações obtidas nesta pesquisa alertam usuários de máquinas de impressão 3D baseadas em código aberto que, antes de prosseguir com suas experiências sobre configuração de parâmetros de processo, realizem estudos de reconhecimento do equipamento, uma vez que falhas no funcionamento podem se sobrepor ao ajuste das variáveis de processo na determinação da qualidade das peças.

A impressora 3D utilizada neste trabalho supre a necessidade de fabricação de protótipos e modelos de exibição. No entanto, quando se aumentam as exigências quanto ao critério de qualidade, o equipamento apresenta baixo desempenho de repetibilidade em função de um conjunto de limitações. Isso, contudo, não inviabiliza o uso do conceito de código aberto em pesquisas acadêmicas, mas fortalece a necessidade de realização de estudos técnicos que busquem reduzir e interpretar tais limitações.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros:

- a) pesquisar metodologias que permitam a calibração de impressoras 3D baseadas em projetos de código aberto;
- b) aprimorar os estudos de caracterização da qualidade de peças fabricadas em equipamentos de código aberto, através de uma descrição abrangente do comportamento mecânico, dimensional, e acabamento das superfícies geradas;
- c) avaliar os efeitos de delaminação das camadas e desprendimentos dos filamentos depositados, através de ensaios mecânicos dinâmicos, em função das características dos filamentos de PLA e a relação com o ajuste dos parâmetros de processo;
- d) aprimorar os métodos de configuração dos parâmetros de processo em *softwares* livres, buscando interpretar as inter-relações entre as variáveis, e oferecer aos usuários bases técnicas para o ajuste e otimização dos parâmetros na construção de peças;
- e) desenvolvimento de um cabeçote extrusor instrumentado, que informe ao usuário em tempo real: os efeitos do

escorregamento do filamento, temperatura nas regiões do cabeçote, e variações de temperatura de processamento. O sistema deve enviar ao usuário sinais de alerta sobre alterações no seu comportamento e interromper o funcionamento da máquina em situações extremas.

REFERÊNCIAS

ADDITIVE MANUFACTURING IN FP7 AND HORIZON 2020, 2014, Bruxelas, Relatório. Bruxelas, Bélgica, Centre Albert Borschette, 2014.

AGARWALA, M. K.; JAMALABAD, V. R.; LANGRANA, N. A.; SAFARI, A.; WHALEN, P. J.; DANFORTH, S. C. Structural quality of parts processed by fused deposition. **Rapid Prototyping Journal**, 2(4), 4-19, 1996.

AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, A; ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, **Rapid Prototyping Journal**, v.8, n.14 p.248-257,2002.

ALBERTI, Eduardo André; SILVA, Leandro João da; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C.M. Manufatura Aditiva: O Papel da Soldagem Nesta Janela de Oportunidade. **Soldag. Insp. São Paulo**, Vol. 19, Nº. 02, pp.190-198, 2014.

ALBURQUERQUE, Alberto Juan. **Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas**. 2014. 138 f. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniería En Tecnologías Industriales, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2014.

ALHUBAIL, M.; ALENEZI, D.; ALDOUSIRI, B. Taguchi-based Optimisation of Process Parameters of Fused Deposition Modelling for Improved Part Quality. **In: International Journal of Engineering Research and Technology**. ESRSA Publications, 2013.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790**: Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastic and electrical insulating materials. United States, 2010.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. United States, 2010.

ANAND, Vivek. **An Investigation into Curved Layer Deposition for Fused Deposition Modelling**. 2010. Master of Philosophy. Auckland University of Technology.

AZEVEDO, Fábio Mariotto de. **Estudo e Projeto de Melhoria em Máquina de Impressão 3D**. 2013. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica Com ênfase em Eletrônica., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

BAGSIK, A.; SCHÖPPNER,V.; KLEMP, E. FDM Part Quality Manufactured With Ultem*9085. "Polymeric Materials 2010". 2010.

BARNATT, Christopher. **3D Printing**: Second Edition. Inglaterra: Explainingthefuture.com, 2014. 306 p.

BELLEHUMEUR, C. T.; LI, L.; SUN, Q.; GU, P. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. **Journal of Manufacturing Processes**, v.6, n.2, p.170-178, 2004.

BELLINI, A. **Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design**. 2002. Ph.D. Dissertation, Philadelphia, USA: Drexel University, 2002.

BELLINI, A.; GÜÇERİ, S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling, **Rapid Prototyping Journal**, v.9, n.4, p.252-264, 2003.

BIJARIMI, Mohd; AHMAD, Sahrim; RASID, Rozaidi. **Mechanical, Thermal and Morphological Properties of PLA/PP Melt Blends**. In: International Conference on Agriculture, Chemical and Environmental Sciences (ICACES'2012), 2012, Dubai (UAE).

BITENCOURT, Schaiene Silveira. **Desenvolvimento de Biocompósitos de Poli(L-Ácido Láctico) com Serragem de Madeira**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Joinville, 2011.

BOUTHILLIER, Jean Le. **The Importance of High Quality Filament in 3D Printing**. 2013. Disponível em: <<http://bootsindustries.com/portfolio-item/importance-of-good-filament/>>. Acesso em: 12 mar. 2014

BORAH, Sharmila. 3D Printer Filament Length Monitor. **International Journal of Science, Technology and Society**. v.2, n. 5, p. 129-132. doi: 10.11648/j.ijsts.20140205.16. 2014.

BRANDÃO, Felipe M.; SANT'ANNA, Diego Rodrigues. **Influência da Estratégia de Fabricação de Peças Prototipadas em FDM no Alongamento e na Resistência à Tração**. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2005, Ilha Solteira – SP.

BRATL, M., **Customizable Personal Manufacturing**. 2013. Master Thesis, Fachhochschule Der Wirtschaft , Hannover.

BRITO, Gustavo F.; AGRAWAL, Pankaj; ARAÚJO Edcleide M.; MELO, Tomás J. A. de. Tenacificação do Poli(Ácido Lático) pela Adição do Terpolímero (Etileno/Acrilato de Metila/Metacrilato de Glicidila). **Polímeros [online]**. 2012, vol.22, n.2, p. 164-169. Epub May 08, 2012. ISSN 0104-1428. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282012005000025>.

BRUIJN, Erike de. **On the viability of the open source development model for the design of physical objects Lessons learned from the RepRap project**. 2010. Master of Science – Department of Information Management, Faculty of Economics and Business, University of Tilburg, Holanda, 2010.

BUGDAYCI, Halil; GRUNERT, Jonas; KELLER, Fabian. **Analysis of Slicing – Tools for Fused Deposition Modeling 3D – Printers and Comparison of Different Printers**. 2014. Institut für Rechnergestützte Ingenieursysteme, Universität Stuttgart, Stuttgart.

BUMGARNER, B., 2013, Getting started with a 3D printer. Make, 12 e 16.

CALVENTE, Miguel Muñiz. **Caracterización de Errores de Fabricación en Impresora 3D de Bajo Coste y Rediseño de la Misma Para Minimizar Dichos Errores**. 2013. Master en Ingeniería

Mecatrónica – Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo, Espanha, 2013.

CANESSA, Enrique. Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development. In: CANESSA, Enrique; FONDA, Carlo; ZENNARO, Marco. **LOW-COST 3D PRINTING: FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT**. Trieste, Italy: Ictp—the Abdus Salam International Centre For Theoretical Physics, 2013. p. 11-18.

CHENNAKESAVA, P.; NARAYAN, Y. Shivraj. **Fused Deposition Modeling-Insights**. In: International Conference on Advances in Design and Manufacturing (ICAD&M'14). Tiruchirappalli, 2014.

CHIENG, Buong Woei; IBRAHIM, Nor Azowa; THEN, Yoon Yee ; LOO, Yuet Ying. Epoxidized Vegetable Oils Plasticized Poly(lactic acid) Biocomposites: Mechanical, Thermal and Morphology Properties. **Molecules**, v. 19, n. 10, p. 16024-16038, 2014.

CHUA, C.K; LEONG, K. F; LIM, C. S. **Rapid Prototyping: Principles and Applications**. 3. ed. Singapura: World Scientific Publishing, 2010. 540 p.

COTTELEER, Mark; HOLDOWSKY, Jonathan; MAHTO, Monika. An overview of additive manufacturing (3D printing). **The 3d Opportunity Primer: The basics of additive manufacturing**, Deloitte University Press, Westlake, Texas, EUA, mar. 2014.

DE JONG, J. P. J. & DE BRUIJN, E. (2013). Innovation Lessons from 3D-Printing, MIT Sloan Management Review, Winter 2013, vol. 54, no. 2, pp. 43-52.

DOMINGO-ESPIN, Miquel; BORROS, S; AGULLO, N; GARCIA-GRANADA, A. A., REYES, G. Influence of Building Parameters on the Dynamic Mechanical Properties of Polycarbonate Fused Deposition Modeling Parts. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 1, n. 2, p. 70-77, 2014.

FOGGIATO, José Aguiomar. **Utilização do Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) na Fabricação Rápida de Insertos para a Injeção de Termoplásticos**. 2005. Tese (Doutorado) –

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FOGGIATTO, José Aguiomar; VOLPATO, Neri; LIMA, Marcus Vinicius Alves de; FRANÇA, Gustavo von Zeska de; D'ESTEFANI, Philip. **Estudos de Parâmetros da Tecnologia de Prototipagem Rápida FDM para Melhorias no Planejamento de Processo**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2009, Belo Horizonte – MG.

FONDA, Carlo. A Practical Guide to Your First 3D Print. In: CANESSA, Enrique; FONDA, Carlo; ZENNARO, Marco. **LOW-COST 3D PRINTING: FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT**. Trieste, Italy: Ictp—the Abdus Salam International Centre For Theoretical Physics, 2013. p. 25-60.

GAJDOŠ, Ivan; SLOTA, Ján. Influence of printing conditions on structure in FDM prototypes. **Tehnički vjesnik-Technical Gazette**, v. 20, n. 2, 2013.

GARLOTTA, D. A Literature Review of Poly (Lactic Acid). v. 9, n. 2, 2001.

GIBSON, I.; ROSEN, D.W.; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer, 2010.

GILES, Harold, WAGNER, John, MOUNT III, Eldridge. **Extrusion : the definitive processing guide and handbook**. William Andrew Inc, Norwich, 2005.

GIORDANO, Veronica. **La Finitura Superficiale in Fused Deposition Modeling**. 2012. Tese (Doutorado) – Sapienza Università di Roma, Roma., 2012.

GONÇALVES, João Filipe Oliveira. **Impressora 3D com Linux CNC**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Automação, Universidade do Porto, Porto, 2014.

GÓRSKI, Filip; WICHNIAREK, R.; KUCZKO, W. Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using Fused Deposition Modelling technology. **Advances in Science & Technology–Research Journal**, v. 7, p. 19-27, 2013.

GURRALA, Pavan Kumar; REGALLA, Srinivasa Prakash. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 9, n. 3, p. 141-149, 2014.

HAGEN, Rainer. Basics of PLA. **Bioplastics Magazine**, Mönchengladbach, Alemanha, v. 4, p. 38-40, jan. 2009.

HAMOD, Haruna. **Suitability of Recycled HDPE for 3D Printing Filament**. 2014. Degree Thesis – Degree Program: Plastics Technology, Arcada University of Applied Science, Finlandia, 2014.

HENTON, D.E.; GRUBER, P., LUNT, J.; and RANDALL, J., 2005. Polylactic Acid Technology. In: Mohanty A.K., Misra, M., and Drzal, L.T.. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites .

HOSSAIN, M. S., RAMOS, J., ESPALIN, D., PEREZ, M., WICKER, R. **Improving Tensile Mechanical Properties of FDM-Manufactured Specimens via Modifying Build Parameters**. In: International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference. Austin, v. 2013, p. 380-392.

HUANG, Bin. **Alternate Slicing and Deposition Strategies For Fused Deposition Modelling**. 2014. Doctor of Philosophy – School of Engineering, Auckland University of Technology, 2014.

JOHNSON,W.M.; ROWELL M.; DEASON, B.; EUBANKS, M.. Comparative evaluation of an open-source FDM system. **Rapid Prototyping Journal**, Vol. 20, Iss 3, pp. 205 – 214, 2014.

KACZMAREK,H.; KWIATKOWSKA, I. Vukovi. Preparation and Characterization of Interpenetrating Networks Based on Polyacrylates and Poly(lactic acid). **eXPRESS Polymer Letters**, v.6, n.1, p.78–94, 2012.

KHAN, Imtiyaz; SHAIKH, Dr. A. A. A Review of FDM Based Parts to Act as Rapid Tooling. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, v.4, Iss 11, p. 59-65, 2014.

KOC, Bahattin. **Computational Geometric Analysis and Planning for 3D Rapid Prototyping Processes**. 2001. Disponível em: <http://repository.lib.ncsu.edu/ir/handle/1840.16/3116>, acesso em: 03/09/2014.

KRETSCHEK, David. **Desenvolvimento de um Cabeçote de Extrusão por Êmbolo para Polipropileno Granulado Visando a Manufatura Aditiva**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

KULKARNI, Prashant; DUTTA, Debasish. An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing. **Computer-Aided Design**, v. 28, n. 9, p. 683-697, 1996.

LAM, Alan Eduardo. **Análise da Resistência Mecânica de Componentes Fabricados pelo Processo de Modelagem Por Fusão e Deposição - FDM**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.

LAN, Justin. **Design and Fabrication of a Modular Multi-Material 3D Printer**. 2013. 64 f. Master of Science - Mechanical Engineering, Department Of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute Of Technology, Massachusetts, 2013.

LANGFORD, William K.. **Achieving Precise Flow in Fused Deposition Modeling Extruders**. 2012. 24 f. Term Paper - Engineering Management 52, Technical And Managerial Communication, Tufts University, Medford, Massachusetts, 2012.

LI, L., SUN, Q., BELLEHUMEUR, C. and GU, P. Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. **Journal of Manufacturing Process**. Vol. 4, n. 2, 2002 a.

LI, L., SUN, Q., BELLEHUMEUR, C., GU, P., "Investigation of bond formation in FDM process. In: **Solid Freeform Fabrication Symp., Austin, TX**, pp. 1-8, 2002 b.

LIM, L.-T.; AURAS, R.; RUBINO, M. Processing Technologies for Poly(lactic acid). **Progress in Polymer Science**, v. 33, n. 8, p. 820-852, 2008.

LIMA, Marcos Vinícios Alves de. **Modelo de Fatiamento Adaptativo para Prototipagem Rápida - Implementação no Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Pesquisa e Pós – Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LUO, R. C., TZOU, J. H., HSIEH, C. Y., & CHOU, H. H. **The development of a thermal extrusion based rapid prototyping mechatronics system**. In: IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]. IEEE. p. 2237-2242. 2002.

LUŽANIN, Ognjan; MOVRIN, Dejan; PLANČAK, Miroslav. Effect of Layer Thickness, Deposition Angle, and Infill on Maximum Flexural Force in FDM-Built Specimens. **Journal for Technology of Plasticity**, v. 39, n. 1, 2014.

MA, Weiyin; HE, Peiren. An Adaptive Slicing and Selective Hatching Strategy for Layered Manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 89, p. 191-197, 1999.

MAGALHÃES, Laurence Colares. **A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MAIA, Izaque Alves; OLIVEIRA, Marcelo Fernandes de; NETO, Paulo Inforçatti; PEREIRA, Frederico David Alencar de Sena; SILVA, Jorge Vicente Lopes da. **Exploração de Recursos de Impressão 3D Para Peças Especiais**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013, Penedo, Itatiaia-RJ.

MALONE E., LIPSON H.: Fab@Home:The personal desktop fabricator kit, **Rapid Prototyping Journal**, Vol.13. nº 4, p. 245-255, 2007.

MARTINS, Silvio Roberto Montenegro; BRANILSON, Luiz Santos Costa, HERMAN, Augusto Lepikson. **Um Sistema CAM Para Máquinas de Prototipagem Rápida de Baixo Custo**. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica , 2010, Campina Grande-PB.

MATTERHACKERS. **HOW TO SUCCEED WHEN PRINTING IN PLA**. 2013. Disponível em: <<http://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-in-pla>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

McLUHAN, M. e FIORE, Q. 1971. Guerra e paz na aldeia global. Rio de Janeiro, Global/Record.

MUTHUI Z. W; NDERITU F. G; HUSSEIN S. A; KAMWERU P. K. GOLICHA; NGUMBU R. Determination of the Glass Transition Temperature and Modulus of PLA Films Using Dynamic Mechanical Analysis at c ° 50 and Amplitude of 10 µm. **Asian Journal of Natural & Applied Sciences**, v. 3(1), 2014.

NANCHARAIAH, T.; RAJU, D. Ranga; RAJU, V. Ramachandra. An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. **International Journal on Emerging Technologies**, v. 1, n. 2, p. 106-111, 2010.

NEWELL, Clint. Direct Digital Manufacturing Tooling & End-Use Parts. 2013.

NONAKA, I; TAKEUCHI, H. The knowledge-creating company: how Japanese companies crete the dynamics of innovation: Oxford: University Press, 1995.

PALLAROLAS, Ernesto Abel Fernando Friedmann. 2013. **Revisão Técnica de Processos de Manufatura Aditiva e Estudo de Configurações Para Estruturas de Impressoras Tridimensionais**. Monografia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PAULINO, R. C. R. Comunicação e comunidades virtuais: participação e colaboração. Florianópolis: Insular, 2012.

PEI, E., CAMPBELL, R.I. and DE BEER, D.J., 2011. Entry level RP machines: how well can they cope with geometric complexity? *Assembly Automation*, 31 (2), p. 153 – 160.

RASAL, Rahul M.; JANORKAR, Amol V.; HIRT; Douglas E. Poly(lactic acid) Modifications. **Progress in Polymer Science**, v. 35, n. 3, p. 338-356, 2010.

RAULINO, Bruno Ribeiro; ALVARES, José Alberto; FERREIRA, João Carlos Ferreira. **Sistema de Cotação Para Prototipagem Rápida – Influência dos Parâmetros de Fabricação no Custo**. . In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013, Penedo, Itatiaia-RJ

REPRAP.ORG. Calibration. 2014. Disponível em: <<http://reprap.org/wiki/Calibration>>. Acesso em: 10 mar.2014.

RODRIGUEZ, J. F.; THOMAS, J. P.; RENAUD, J. E. Characterization of the Mesostructure of Fused - Deposition Acrylonitrile – Butadiene – Styrene Materials. **Rapid Prototyping Journal**. Vol. 6, No. 3, 2000, p. 175 – 185.

SALINAS, Richard. **3D Printing with RepRap Cookbook**. Birmingham: Packt Publishing, 2014. 346 p.

SANTOS, Diego Vieira dos. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Compósitos a Base de Poli(l-ácido láctico) e Nano-Hidroxiapatita Obtidos por Extrusão**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SATO, Juliana Alves Pereira. **Fabricação e Caracterização de Sistemas Poliméricos Nanoestruturados Obtidos Por Meio do Uso da Técnica de Eletrofiação**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Nanociências e Materiais Avançados, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2011.

SAURAMO, Heljo. **The proliferation of a new-market disruptive innovation: case personal 3D printers**. 2014. Master's Degree – Internacional Business, Aalto University School of Business, Finlandia, 2014.

SELLS, E. A. **Towards a Self-Manufacturing Rapid Prototyping Machine**. 2009. p. 43. Thesis of Doctor of Philosophy. University of Bath, Bath, UK, 2009.

SILVEIRA, G. B.; HINKEL, L. B.; SANTANA, L.; SABINO, A. C. **Avaliação do Desempenho Térmico de uma Plataforma de Construção *Open Source* para o Processo FDM**. In: 3º Seminário de Inovação Tecnológica e Tecnologia do IFSul, 2014, Sapucaia do Sul - RS.

SIMIELLI, Edson Roberto; SANTOS, Paulo Aparecido dos. **PLÁSTICOS DE ENGENHARIA: PRINCIPAIS TIPOS E SUA MOLDAGEM POR INJEÇÃO**. São Paulo: Artliber, 2010. 198 p.

SOARES, Fernanda Coutinho. **Laminados de Poli(Ácido Láctico)/Amido Termoplástico Recobertos Com Quitosana Reticulada: Obtenção e Avaliação das Propriedades Físico – Químicas**. 2012. Programa de Pós Graduação em Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SOOD, Anoop Kumar; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. **Materials & Design**, v. 30, n. 10, p. 4243-4252, 2009.

SOOD, Anoop Kumar; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials & Design**, v. 31, n. 1, p. 287-295, 2010.

SOOD, Anoop K.; OHDAR, Raj K.; MAHAPATRA, Siba S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. **Journal of Advanced Research**, v. 3, n. 1, p. 81-90, 2011.

STEPHEN, A. O.; DALGARNO, K. W.; MUNGUIA, J. Quality assurance and process monitoring of fused deposition modelling made parts. In: **High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping**, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013 (a). CRC Press, 2013. p. 31.

STEPHENS, B., AZIMI, P., El Orch, Z., RAMOS, T.. Ultrafine Particle Emissions From Desktop 3D Printers, **Atmospheric Environment**, Vol. 79, p. 334-339, 2013 (b).

STRATASYS INC. (Minneapolis). Steven Scott Crump. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**. US n. 5121329, 30 out.1989, 09 junho 1992.

STRATASYS, INC. (Estados Unidos). James W. Comb; William R. Priedeman, Jr.; Paul J. Leavitt; Robert L. Skubic; John Samuel Batchelder. **HIGH-PRECISION MODELING FILAMENT**. EUA nº US6866807 B2, 17 abr. 2002, 21 set. 2001. 2005.

SUN, Q.; RIZVI, G.; BELLEHUMEUR, C.; GU, P. **Experimental Study of the Cooling Characteristics of Polymer Filaments in FDM and Impact on the Mesostructures and Properties of Prototypes**. In: Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, ago 2003.

SUN, Q.; RIZVI, G.; BELLEHUMEUR, C.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**. Vol. 14 / 2, 2008, pp. 72 – 80.

SYSTEMS, 3D. **3D Systems Acquires Bits From Bytes**. 2010. Disponível em: <<http://www.3dsystems.com/fr/press-releases/3d-systems-acquires-bits-bytes>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

TURNER, Brian N.; STRONG, Robert; GOLD, Scott A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 192-204, 2014

VOLPATO,N.; AHRENS,C. H.; FERREIRA, C. V.; GÜNTHER, P.; CARVALHO, J. de; SANTOS, J R. L. dos; SILVA, J. V. L. da.

Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações. Primeira Edição. São Paulo: Blücher, 2007. 244 p.

VOLPATO, Neri; FOGGIATTO José Aguiomar; RADIGONDA, André Luis. **Implementação de uma Variação do Fatiamento Adaptativo no Processo FDM.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul – RS.

VOLPATO, Neri; FOGGIATTO José Aguiomar; LIMA, Marcus Vinicius Alves de. **Modelos de Fatiamento Adaptativo em Processo de Prototipagem Rápida.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2009, Belo Horizonte – MG.

VOLPATO, Neri; OLIVEIRA, João Henrique Silveira Alves de; SOUZA, Tiago Rodrigo de. **A Process Planning Applicative for Rapid Prototyping Technology.** In: International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto-MG, 2005.

WEEREN, R. Van; AGARWALA, M.; JAMALABAD, V. R.; BANDYOPHADYAY, A. ;VAIDYANATHAN, R.; LANGRANA, N.; SAFARI, A.; WHALEN, P.; DANFORTH, S.; BALLARD, C. **Quality of Parts Processed by Fused Deposition.** 1995. Disponível em : <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/1995/1995-37-Weeren.pdf> . acesso em : 15 de outubro de 2013.

XU, F.; LOH, H. T.; WONG, Y. S. Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. **Rapid Prototyping Journal**, v. 5, n. 2, p. 54-60, 1999.

YUAN, Liu. **A Preliminary Research on Development of a Fiber-Composite, Curved FDM System.** 2008. 87 f. Degree of Master - Department Of Mechanical Engineering, National University Of Singapore, Singapore.

ZEYU, Lin. **Exploration 3D Printing.** 2014. Bachelor Thesis – Degree Programme in Industrial Management, Savoina.

ZHOU M.Y, XI J.T. and YAN J.Q., Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping, **Advanced Manufacturing Technological**. n.23 p.20-27, 2004.

ZIEMIAN, C. W.; CRAWN III, P. M. Computer aided decision support for fused deposition modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 7, n. 3, p. 138-147, 2001.

APÊNDICE A – Caracterização dos materiais

As Figuras 78, 79, e 80 correspondem respectivamente aos resultados obtidos na análise de TGA para os filamentos de PLA cinza, natural A, e natural B.

Figura 78 – Curva TGA para o filamento de PLA cinza.

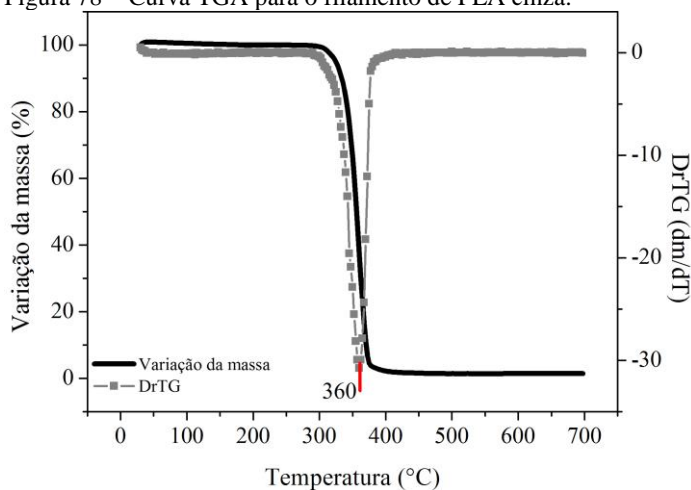


Figura 79 – Curva TGA para o filamento de PLA natural A.

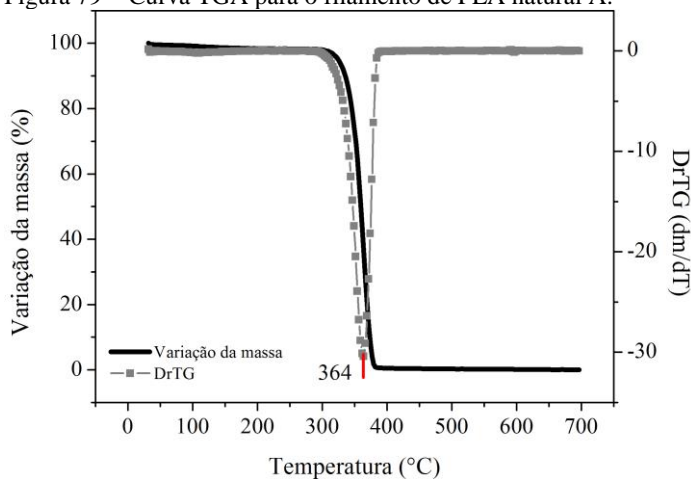
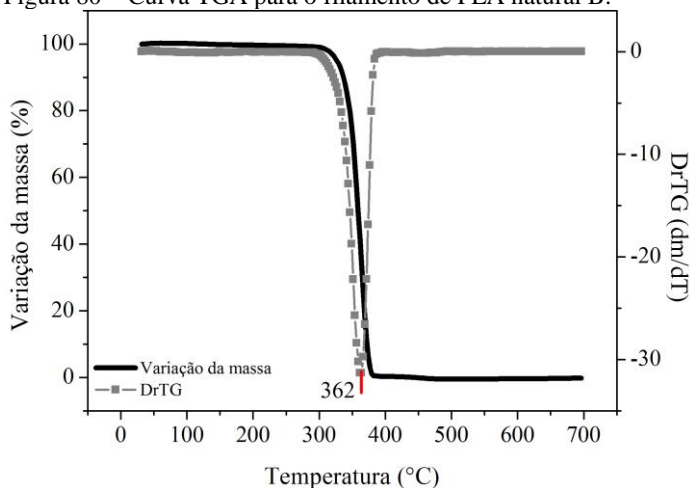


Figura 80 – Curva TGA para o filamento de PLA natural B.



Seguindo a apresentação dos dados referentes à etapa de caracterização dos filamentos de PLA, são apresentadas as curvas de FTIR para os materiais cinza (Figura 81), natural A (Figura 82), e natural B (Figura 83).

Figura 81 – Curva FTIR para o filamento de PLA cinza.

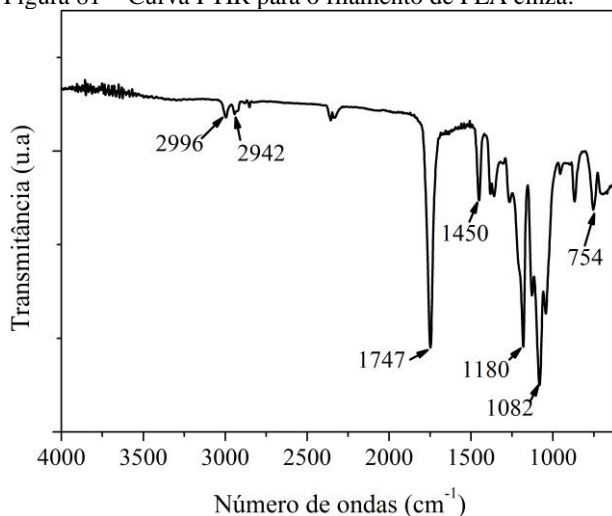


Figura 82 – Curva FTIR para o filamento de PLA natural A.

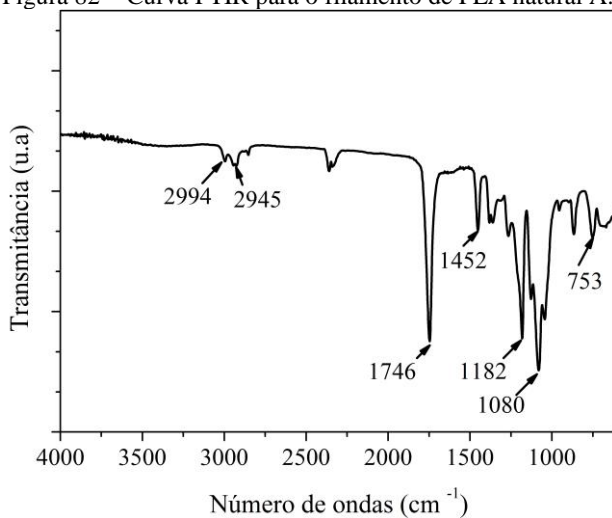
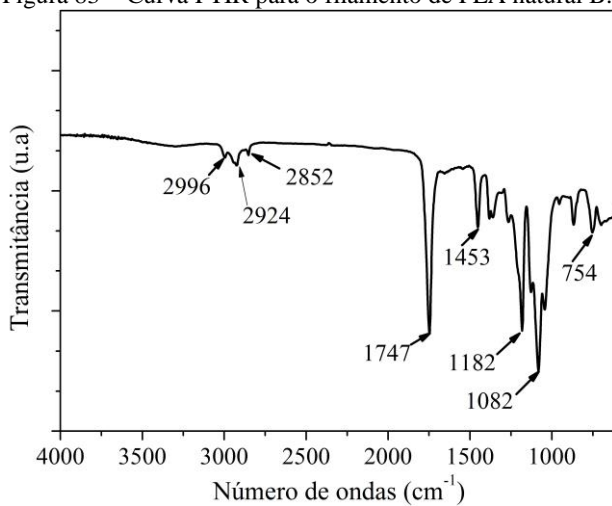


Figura 83 – Curva FTIR para o filamento de PLA natural B.



APÊNDICE B – Avaliação do cabeçote extrusor

A seguir são apresentados os resultados obtidos em cada um dos ensaios de extrusão livre, realizados no procedimento de análise do cabeçote extrusor.

Tabela 34 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 20 mm/min e 190 °C.

Amostras	ERF (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	1,36	0,00	100,00	1,36	98,64
2	4,01	0,00	100,00	4,01	95,99
3	3,38	0,00	100,00	3,38	96,62
4	0,35	0,00	100,00	0,35	99,65
5	0,01	0,00	100,00	0,01	99,99
6	0,26	0,00	100,00	0,26	99,74
7	0,58	0,00	100,00	0,58	99,42
\bar{X}	1,42	0,00	100,00	1,42	98,58
σ	1,62	0,00	0,00	1,62	1,62

Tabela 35 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 20 mm/min e 200 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	1,99	0,00	100,00	1,99	98,01
2	3,29	0,00	100,00	3,29	96,71
3	4,47	0,00	100,00	4,47	95,53
4	3,84	0,09	99,91	3,93	96,07
5	3,10	0,00	100,00	3,10	96,90
6	1,07	0,00	100,00	1,07	98,93
7	0,03	0,00	100,00	0,03	99,97
\bar{X}	2,54	0,01	99,99	2,55	97,45
σ	1,58	0,03	0,03	1,60	1,60

Tabela 36 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 20 mm/min e 210 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	2,17	0,00	100,00	2,17	97,83
2	2,34	0,00	100,00	2,34	97,66
3	2,52	0,00	100,00	2,52	97,48
4	2,42	0,00	100,00	2,42	97,58
5	0,82	0,00	100,00	0,82	99,18
6	0,31	0,00	100,00	0,31	99,69
7	0,83	0,00	100,00	0,83	99,17
\bar{X}	1,63	0,00	100,00	1,63	98,37
σ	0,94	0,00	0,00	0,94	0,94

Tabela 37 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 40 mm/min e 190 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	3,53	0,24	99,76	3,77	96,23
2	2,80	0,12	99,88	2,92	97,08
3	3,66	0,12	99,88	3,78	96,22
4	2,82	0,12	99,88	2,94	97,06
5	10,30	0,35	99,65	10,65	89,35
6	5,17	0,10	99,90	5,27	94,73
7	3,51	0,12	99,88	3,63	96,37
\bar{X}	4,54	0,17	99,83	4,71	95,29
σ	2,66	0,09	0,09	2,73	2,73

Tabela 38 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 40 mm/min e 200 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	2,33	0,12	99,88	2,45	97,55
2	2,04	0,11	99,89	2,15	97,85
3	1,59	0,11	99,89	1,70	98,30
4	1,69	0,12	99,88	1,81	98,19
5	1,43	0,11	99,89	1,54	98,46
6	0,69	0,11	99,89	0,80	99,20
7	1,60	0,12	99,88	1,72	98,28
\bar{X}	1,62	0,11	99,89	1,74	98,26
σ	0,51	0,01	0,01	0,52	0,52

Tabela 39 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 40 mm/min e 210 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	3,91	0,11	99,89	4,02	95,98
2	3,04	0,12	99,88	3,16	96,84
3	2,93	0,12	99,88	3,05	96,95
4	5,23	0,11	99,88	5,34	94,66
5	3,02	0,13	99,87	3,15	96,85
6	4,09	0,12	99,88	4,21	95,79
7	1,84	0,12	99,88	1,96	98,04
\bar{X}	3,44	0,12	99,88	3,56	96,44
σ	1,08	0,01	0,01	1,08	1,08

Tabela 40 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 60 mm/min e 190 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	7,13	0,15	99,85	7,28	92,73
2	7,31	0,15	99,85	7,46	92,53
3	8,05	0,15	99,85	8,20	91,81
4	6,36	0,16	99,84	6,52	93,49
5	6,02	0,17	99,83	6,19	93,82
6	6,14	0,18	99,82	6,32	93,69
7	5,79	0,16	99,84	5,95	94,06
\bar{X}	6,69	0,16	99,84	6,85	93,16
σ	0,83	0,01	0,01	0,82	0,82

Tabela 41 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 60 mm/min e 200 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	2,76	0,18	99,82	2,94	97,06
2	3,15	0,17	99,83	3,32	96,69
3	3,18	0,16	99,84	3,34	96,67
4	3,23	0,16	99,84	3,39	96,62
5	4,03	0,15	99,85	4,18	95,83
6	3,50	0,17	99,83	3,67	96,34
7	3,31	0,15	99,85	3,46	96,54
\bar{X}	3,31	0,16	99,84	3,47	96,54
σ	0,39	0,01	0,01	0,38	0,38

Tabela 42 – Resultados obtidos no ensaio de extrusão livre, com 60 mm/min e 210 °C.

Amostras	EFR (%)	PDC (%)	CT (mm)	ETNS (%)	CE (mm)
1	2,50	0,17	99,83	2,67	97,33
2	1,92	0,16	99,84	2,08	97,92
3	2,73	0,16	99,84	2,89	97,11
4	2,40	0,19	99,81	2,59	97,41
5	2,46	0,38	99,61	2,84	97,16
6	2,40	0,18	99,82	2,58	97,42
7	2,45	0,18	99,82	2,63	97,37
\bar{X}	2,41	0,20	99,80	2,61	97,39
σ	0,24	0,08	0,08	0,26	0,26